

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**ФАКУЛЬТЕТ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**  
**КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

«До захисту допущено»

В. о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ **Владислав ШЛИКОВ**  
(підпис) (Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Дипломна робота**

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою \_\_\_\_\_ **Клінічна інженерія** \_\_\_\_\_  
(назва)

спеціальності **163 Біомедична інженерія**  
(код та назва)

на тему: \_\_\_\_\_ **Паливний елемент на воді для застосування в медицині** \_\_\_\_\_

Виконав: студент **IV** курсу, групи **БМ-61**

\_\_\_\_\_ **Зорін Богдан Сергійович** \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник **к.т.н., доц. каф. БМІ Богомолів Микола Федорович** \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Консультант **2,3 к.т.н., доц. каф. надійності техніки Троць Адам Адамович** \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Консультант **5 доц. каф. ОПЦБ Демчук Гліб Вікторович** \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Нормоконтроль **ст. вик каф. БМІ Юр'єва Катерина Олександрівна** \_\_\_\_\_  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Рецензент **проф. каф. ББЗЛ, д.т.н., проф. Попадюха Юрій Андрійович** \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут)  
Кафедра  
Рівень вищої освіти  
Спеціальність  
Освітньо-професійна програма

Біомедичної інженерії  
Біомедичної інженерії  
Перший (бакалаврський)  
Біомедична інженерія  
Клінічна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Владислав ШЛИКОВ  
(підпис) (Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)

“ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

Зоріну Богдану Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Паливні елементи на воді для використання в медицині» керівник роботи Богомолів Микола Федорович к.т.н., доцент затверджені наказом по університету від «25» травня 2020р. № 1191-с.
2. Термін подання студентської роботи «8» червня 2020 року.
3. Вихідні повідомлення на роботі: наявні та книги з електрохімія, наукова література на тематику паливних елементів; програмні продукти «Proteus», «MathCAD».
4. Змінення роботи (пояснювальної записки) аналіз наукової літератури; класифікація паливних елементів у розрізі їх можливого застосування в медицині; розробка принципів схем паливного елементу на воді; виготовлення прототипу паливного елементу; моделювання схем інвертора 12 – 220 В у програмному середовищі «Proteus»; огляд перспективних напрямків застосування паливного елементу на воді.
5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація (слайдів), малюнки.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
2,3	Троц А. А. кандидат технічних наук, доцент кафедри надійності техніки НУБіП України		
5	Демчук Г.В., доцент кафедри охорони праці, промисловості та цивільної безпеки		

## 7. Дата видачі завдання 13.04.2020

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Пошук теоретичного матеріалу	13.04.20 – 17.04.20	
2	Аналіз науково-технічної літератури	18.04.20 – 25.04.20	
3	Виконання розрахунків	26.04.20 – 01.05.20	
4	Розробка конструкції паливного елементу	02.05.20 – 10.05.20	
5	Підбір матеріалів та виготовлення прототипу	11.05.20 – 18.05.20	
6	Моделювання схеми інвертора	21.05.20 – 22.05.20	
7	Охорона праці	23.05.20 – 25.05.20	
8	Отримання рецензії та відгуку	04.06.20 – 06.06.20	
9	Здача роботи на нормоконтроль	05.06.20	
10	Захист дипломної роботи	17.06.20	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Богдан ЗОРІН**

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Микола БОГОМОЛОВ**

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

**Паливний елемент на воді для медицини** / Бакалаврська атестаційна робота. **Зорін Богдан Сергійович**. Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», факультет біомедичної інженерії, кафедра біомедичної інженерії, група БМ-61, 2020 — ілюстрацій — 16, таблиць — 17, посилань — 39.

### **Ключові слова:**

Паливний елемент; протонобмінна мембрана; джерело живлення; активний шар; платинова чернь; платина; медицина; каталізатор.

### **Короткий зміст роботи:**

Метою даної роботи було розробити паливний елемент на воді, зокрема його прототип і обґрунтувати переваги розробки перед аналогами й перспективи його застосування в медицині.

В даній роботі представлено огляд науково-технічної літератури по сучасних паливних елементах, їх видах перевагах та недоліках. Виконано короткий огляд найближчих аналогів до розробленого паливного елемента і наведено переваги розроблюваного прототипу перед ними.

Представлено розроблений прототип та його функціональну схему, а також деякі розрахунки паливного елемента з протонобмінною мембраною. В роботі наведено інструкцію по виготовленню прототипу.

Паливний елемент на воді передбачається використовувати в якості основного або резервного джерела живлення для медичного обладнання невеликої потужності в умовах відсутності доступу до мережі живлення 220 В. Ця розробка є вигідною, оскільки може частково або повністю замінити акумулятори в таких приладах, як електрокардіограф, тонометр, мобільних апаратів штучного кровообігу та доплерівських сканерах. Дане джерело енергії дає можливість економити паливо, ресурс силових агрегатів техніки або ж може використовуватись в якості резервного джерела у випадку виходу з ладу основного, якщо мова йде про умови польового шпиталю.

## ESSAY

**Fuel cell on water for medicine** / Bachelor's thesis. **Bohdan Zorin**. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky KPI", Faculty of Biomedical Engineering, Department of Biomedical Engineering, group BM-61, 2020 — illustrations – 16, tables – 17, references – 39.

### **Keywords:**

Fuel cell; proton exchange membrane; power cell active layer; platinum black; platinum; medicine; catalyst.

### **Summary of work:**

The purpose of this work was development a fuel cell on water, particularly make a prototype of this fuel cell and to substantiate the advantages of development over analogues and prospects for its use in medicine.

This work presents a review of scientific and technical literature about modern fuel cells, their types, advantages and disadvantages. In brief overview of the closest analogues, the advantages of the developed prototype over them is shown.

The developed prototype and its functional scheme are presented, as well as some calculations of a fuel cell with a proton exchange membrane. Also, the instructions for making a prototype are included.

The fuel cell on water is supposed to be used as the main or reserve power cell for the medical equipment with small power consumption in the condition of lack of access to a power grid of 220 V. This development is favorable because can partially or completely replace accumulators in such devices as the electrocardiograph, tonometer, mobile artificial circulation devices and Doppler scanners. These energy sources allow to produce fuel economy, resources of engines and generators, also it can be used like a backup source when the main has failed, it is actual for a field hospitals.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ .....	9
1.1 Загальні принципи роботи паливних елементів .....	9
1.2 Класифікація паливних елементів .....	13
1.3 Огляд аналогів паливних елементів .....	20
1.3.1 Зарядний пристрій на основі водневого паливного елементу з гідридними утворювачами водню .....	20
1.3.2 Зарядний пристрій «HydroFILL» .....	21
1.3.3 Зарядний пристрій «Powertrekk» .....	22
1.3.4 Паливний елемент міліметрового масштабу .....	23
Висновки до розділу 1 .....	24
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ПАЛИВНОМУ ЕЛЕМЕНТІ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ БІОМЕДИЧНОЇ АПАРАТУРИ ...	26
2.1. Математична модель паливного елементу на воді .....	26
2.2. Опис транспорту іонів через мембрани різних типів .....	30
2.3. Затоплення пор катодного активного шару водою .....	33
2.4. Видалення води з пор активного шару шляхом випаровування .....	34
2.5. Фільтрація води в зернах підложки .....	36
Висновки до розділу 2 .....	37
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТУ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ .....	39
3.1. Дослідження властивостей різних видів активного шару .....	39
3.2 Технологія виготовлення паливного елементу .....	44
3.3 Розробка дослідного зразка паливного елементу .....	46
Висновки до розділу 3 .....	50

РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТА НА ВОДІ В МЕДИЦИНІ .....	52
4.1 Можливі застосування паливного елемента в медичних приладах .....	52
4.2 Схема підключення апаратури розрахованої на живлення від мережі 220 В до паливної батареї паливних елементів з меншою напругою .....	55
Висновки до розділу 4 .....	56
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	58
5.1 Характеристика паливного елемента, який розробляється .....	58
5.1.1 Характеристики .....	58
5.1.2. Складові частини схеми .....	59
5.1.3 Характер взаємодії паливного елемента в системі «людина – об'єкт» .....	59
5.2 Оцінка потенційних небезпек, що створюються конструкцією паливного елемента та заходи їх усунення .....	60
5.2.1 Небезпека ураження людини електричним струмом .....	60
5.2.3 Небезпека пожежі .....	61
5.3 Розробка «Інструкції з техніки безпеки при експлуатації паливного елемента» .....	62
Висновки до розділу 5 .....	63
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	65
Додаток А.....	70

## ВСТУП

Останнім часом дуже гостро постала проблема альтернативних джерел палива. Причиною цього слугувала сукупність факторів:

- підвищене використання нафти в промисловості, що призвело до сильного зменшення її запасів;
- погіршення екології внаслідок спалювання гігантських кількостей різноманітних видів палива. Це суттєво підвищило кількість викидів окису і двоокису вуглецю;
- збільшення кількості фабрик, заводів та підприємств;
- вирубування лісів у великих кількостях.

Ці всі фактори зумовлюють активний пошук альтернатив у енергетиці.

Перспективною альтернативою двигунам внутрішнього згоряння є електричні двигун. Вони компактні, економічні, простіші за конструкцією і у них дуже високий ККД. Але постає питання накопичення та збереження енергії. Очевидним варіантом є акумулятори, але на даний момент вони далекі від ідеалу. Зокрема самі поширені з них – літій іонні мають низку проблем:

- низька щільність енергії;
- погана робота і зменшення ємності в умовах низьких температур;
- відносно швидка втрата ємності;
- великий термін заряджання.

Але існує вигідна альтернатива – паливні елементи. Паливний елемент – електрохімічний пристрій, який перетворює енергію хімічної реакції в електричну, при цьому реагенти подаються у нього зовні.

Паливні елементи екологічні і не потребують тривалої зарядки, а можуть бути просто швидко заправлені. Їх ККД доволі високий і може сягати 80%, вони надійні і не містять великої кількості елементів, але існує проблема заправки через не розвинену інфраструктуру заправок.



# РОЗДІЛ 1

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### 1.1 Загальні принципи роботи паливних елементів

Паливний елемент – електрохімічний генератор, який забезпечує пряме перетворення хімічної енергії в електричну. Відновник (паливо) може бути різним, але принцип дії залишається однаковим. Розглянемо його на прикладі водневого паливного елементу.

В паливному елементі протікає процес зворотного електролізу – за допомогою двох електродів, між якими знаходиться електроліт. На анод подається водень, а на катод – кисень. Для більш швидкого утворення іонів анод покривається каталізатором (ефективним рішенням є пориста платина).

Каталізатор на аноді допомагає іонізувати водень, в результаті чого утворюються додатні іони водню і вільні електрони, які відправляються в зовнішнє електричне коло з навантаженням. Електрони із зовнішнього кола поступають до кисню на аноді і разом утворюють негативно заряджені іони. В цей час через електроліт від аноду до катоду рухаються позитивні іони водню. На стороні катоду іони об'єднуються, утворюючи воду, яка і є продуктом реакції.

Принципова будова водневого паливного елементу зображена на рисунку 1.

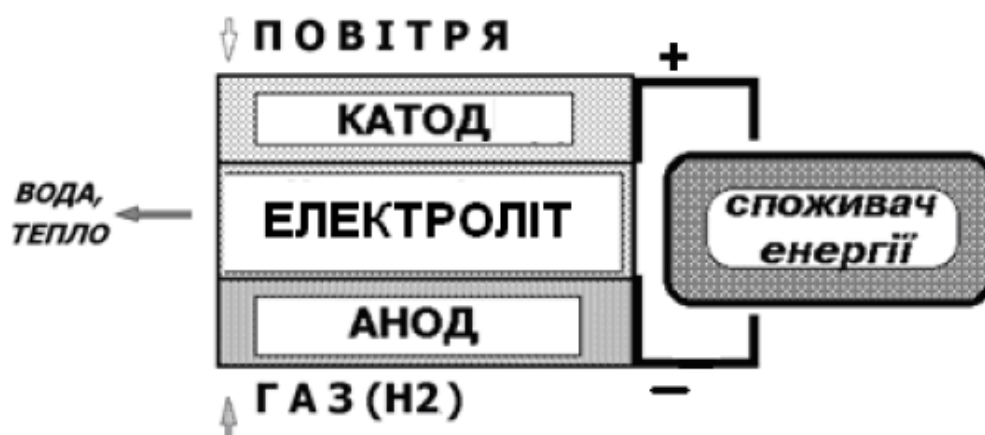


Рисунок 1.1 — Принципова будова водневого паливного елементу

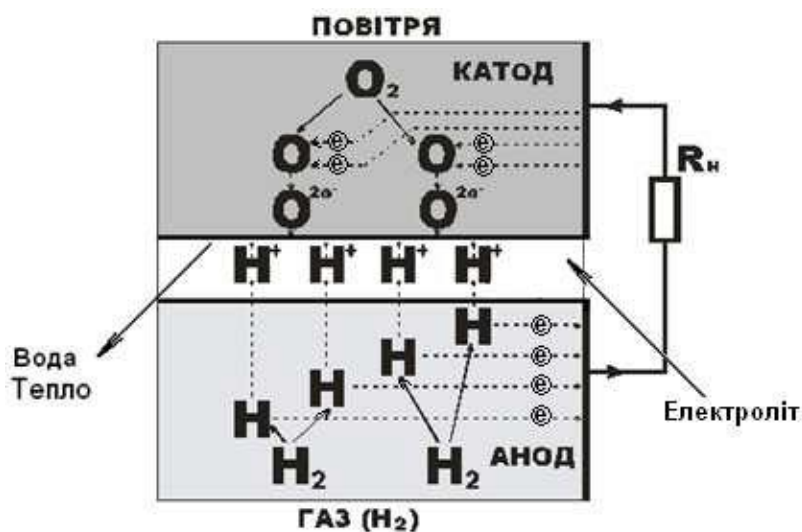


Рисунок 1.2 — Принцип роботи водневого паливного елементу

Отже, до аноду безперервно підводиться водень (рис. 2). Діапазон тиску для водню та кисню може бути досить широким і виступає регулятором потужності паливного елементу [2].

Атоми водню мають властивість вільно від'єднувати електрони. Їм досить незначного зовнішнього впливу для того, щоб стати іоном. Це означає, що у водні безперервно відбувається окисно-відновна реакція:



де  $H_2$  – молекула водню;  $H^+$  – іон водню;  $e^-$  – електрон.

Проте, реакція зміщена вліво, і основна частина водню (ядро) перебуває у неіонізованому стані. Для зміщення реакції вправо використовують каталізатори, як правило, платину (для максимальної ефективності анод покривається пористою платиною). В результаті забезпечується легший вихід електрона з орбіти атома водню і його перехід на платиновий електрод [28].

Отже, більша частина водню, яка пройшла через каталізатор, стає іонізованою (реакція зміщується вправо). Далі іони водню  $H^+$  вільно переміщуються через електроліт у бік катода. До катода підводиться окисник (кисень), який під дією каталізатора також іонізується. Надлишкова валентність

на катоді та велика концентрація електронів (які утворилися після іонізації водню) на аноді створюють різницю потенціалів, яка змушує електрони рухатись по зовнішньому електричному колу (на рисунку 2 зображене як  $R_n$ ) і, відповідно, протікання такої реакції:



Після аніонізації відновлені атоми кисню сполучаються з іонами водню (протонами), які пройшли через електроліт. Відбувається нагрівання, а виділена теплова енергія зосереджується у водяній парі:



Слід зазначити, що різниця потенціалів на електродах описується рівнянням Нернста[2]:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{a_{ox}}{a_{Red}}, \quad (1.4)$$

де  $E^0$  – стандартний електродний потенціал;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – абсолютна температура;  $F$  – число Фарадея;  $N$  – число моль електронів, які беруть участь у процесі;  $a_{ox}$ ,  $a_{Red}$ , – активності відповідно окисленої і відновленої речовини, які брали участь в реакції.

Припустивши, що процес відбувається за звичайних умов і вся маса речовин бере участь у реакції, різниця потенціалів між електродами залежить тільки від активності реагентів (у даному випадку, коли йдеться про водень і кисень, вона становить близько 1,3 В). Напруга на електродах навантаженого паливного елемента знаходить на рівні 0,7 В [10].

Отже можна зробити висновок, що в основі роботи паливної комірки лежить розділення шляху протікання складових палива (протон, електрон) до

					БМ61.03.205.1191	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

окисника, що забезпечується електролітом.

					БМ61.03.205.1191	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2 Класифікація паливних елементів

Паливні елементи поділяються за видом електроліту (мембрани) та робочою температурою. Електроліт буває рідким або твердим, лужним, сольовим чи кислотним, а мембрана полімерною, керамічною, крім того вони мають бути іонопровідними при робочій температурі. Температура є вирішальним фактором для визначення сфери застосування [19].

До основних типів паливних елементів відносять:

- паливний елемент на твердому оксидному електроліті (Solid Oxid Fuel Cell (SOFC));
- паливний елемент на основі розплавленого карбонату (Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC));
- паливний елемент з прямим окисненням метанолу (Direct Methanol Fuel Cell (DMFC));
- на основі фосфорної кислоти Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC);
- лужний паливний елемент (Alkaline Fuel Cell (AFC));
- паливний елемент з протонно-обмінною мембраною (Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) [3].

Основні характеристики наведених типів паливних елементів вказані в табл. 1[3].

Тверді електроліти (ТЕ) – це кристалічні, полікристалічні чи аморфні (склоподібні) матеріали, в яких іони певного знаку здатні рухатись під дією зовнішнього електричного поля, що забезпечує їм провідність в інтервалі ( $\sim 10^{-3}$  –  $10$  См/см) в залежності від температури.

Іонна складова загальної провідності твердих електролітів на 5 – 6 порядків вища за електронну, тобто числа переносу практично дорівнюють 1, а значення коефіцієнтів дифузії за порядком величини співставні зі значеннями розчинів сильних електролітів чи розплавів ( $10^{-5}$  –  $10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с). Характеристики

					БМ61.03.205.1191	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

деяких твердих електролітів наведені в табл. 1.2 [3].

Таблиця 1.1 — Класифікація паливних елементів

	Низькотемпературні ПЕ				Високотемпературні ПЕ	
Назва ПЕ	Лужний (Alkaline Fuel Cell, FC)	На протонно-обмінній мембрані (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, EMFC)	З прямим окисленням метанолу (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)	Фосфорно-кислотний (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)	На основі розплаву карбонату (Molten Carbonate Fuel Cell, CFC)	На твердому оксиді (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)
Анод	Вуглець, С	Вуглець, С	Вуглець, С	Вуглець, С + тефлон	Ni+10% Cr	Ni + (Zr, Y)O <sub>2</sub>
Катод	Вуглець, С	Вуглець, С	Вуглець, С	Вуглець, С + тефлон	NiO	(La, Sr)MnO
Електроліт	Калійний луг (KOH)	Полімерна протонно-провідна мембрана	Полімерна протонно-провідна мембрана	Фосфорна кислота в матриці (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Розплав карбонату (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	Цирконієво-ітрієвий керамічний електроліт (ZrO <sub>2</sub> Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Роб. температура, °C	60 – 120	50 – 100	50 – 120	130 – 220	600 – 700	700 – 1000
Каталізатор	Pt/Rb	Pt	Pt	Pt	Ni	Ni
Паливо	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>
Носій заряду	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	O <sup>-2</sup>
Реформування палива	Зовнішнє	Зовнішнє	Зовнішнє	Зовнішнє	Внутрішнє	Внутрішнє
Електричний ККД, %	40 – 50	35 – 50	20 – 40	35 – 40	45 – 60	50 – 65
Можлива потужність	10 – 100 кВт	1 – 250 кВт	1 – 100 кВт	до 11 МВт	0,1 – 2,2 МВт	до 20 МВт

Таблиця 1.2. — Характеристики твердих електролітів.

Електроліт	Рухливий іон	Провідність σ, См/м	Енергія іонізації E, eB
RbAg <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	Ag <sup>+</sup>	28	0,10
Ag <sub>6</sub> WO <sub>4</sub> I <sub>4</sub>	Ag <sup>+</sup>	4,2	0,25
Cs <sub>2</sub> Ag <sub>3</sub> Br <sub>3</sub> I <sub>2</sub>	Ag <sup>+</sup>	0,1	0,38

$\text{Cb}_4\text{RbCl}_3\text{I}_2$	$\text{Cu}^+$	47	0,12
--------------------------------------	---------------	----	------

Продовження таблиці 1.2

$\text{Na}_2\text{O} \cdot 10\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}^+$	0,5	0,15
$\text{Na}_5\text{DySi}_4\text{O}_{12}$	$\text{Na}^+$	0,5	0,21
$\text{H}_2\text{UO}_2\text{PO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}^+$	0,32	0,32
$\text{H}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40} \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}^+$	1,2	0,43
$\text{Cs}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}^+$	1,6	0,22
$\text{H}_2\text{SO}_4$ (10 мас. %)		39,2	

PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) – паливний елемент з полімерною протонобмінною мембраною. В якості електроліту в таких паливних елементах використовується мембрана з полімеру товщиною приблизно в 2 – 7 аркушів звичайного паперу. Відновлювачем виступає чистий водень, причому максимально допустима частка домішок окису вуглецю – 10 – 100 мг/кг.

Ці елементи працюють в доволі низьких температурах – до 100 °С, мають високу щільність енергії, а також забезпечують можливість швидко змінювати потужність. Для паливних елементів з протонобмінною мембраною характерна висока вихідна напругу – близько 0,7 В з однієї комірки.

Серед всіх видів паливних елементів PEMFC знайшли сьогодні найбільше застосування: вони використовуються в транспорті (майже 100% всіх автомобілів, що працюють на водні), в якості первинних і резервних джерел енергії, в портативній електроніці. В даний час спостерігається стрімкий розвиток цієї технології, зокрема, в автомобільній галузі. У 2005 році близько 75% всіх стаціонарних установок, що працюють на водні з потужністю до 10 кВт були побудовані саме за технологією PEMFC. Великі установки можуть розвивати потужність до 300 кВт (General Motors).

Деякі виробники паливних елементів на основі протонобмінної мембрани: Ballard Power Systems (Канада), FCFCP (Китай), Cellkraft AB (Швеція), European fuel cell GmbH (Німеччина), Heliocentris Energiesysteme GmbH (Німеччина), Honda (Японія), h-tec Hydrogen Energy Systems (Німеччина), IdaTech (США), New Japan Eco-System Corporation (Японія), Plug Power Inc. (США), Protonex Technology Corporation (США), UTC Power (США).

					БМ61.03.205.1191	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) – паливні елементи з прямим окисленням метанолу. Паливні елементи цього класу є однією з реалізацій елементів з іонно-обмінною мембраною. У них використовується той же електроліт, що і в найбільш поширених PEMFC, але паливо замінене з чистого водню на водний розчин метилового спирту (метанол). Головна перевага паливних елементів з прямим окисленням метанолу в порівнянні з водневими елементами з протонобмінною мембраною – можливість використання метанолу в рідкому вигляді, який більш вигідний для збереження і транспортування, ніж водень. На відміну від інших технологій, в яких використовується рідина замість газу, в DMFC немає необхідності в застосуванні зовнішнього конвертора для отримання чистого водню і здійснення процесу «реформінгу», оскільки виділення водню з метанолу відбувається безпосередньо в електроліті.

Недоліком DMFC в порівнянні з PEMFC є більш висока температура функціонування ( $120^{\circ}\text{C}$ ), яка, однак, не є достатньою для ефективного хімічного перетворення. У зв'язку з цим виникає необхідність у використанні платинових каталізаторів, що призводить збільшення вартості паливних елементів.

У паливних елементів з прямим окисленням метанолу існує ще проблема використання метанолу в якості палива. Метанол є отруйною речовиною: доза в 10 грам може привести до втрати зору, а в 30 грам – до смерті. В результаті, розробники поступово переходять до інших рідин, що містять водень. Одним з найбільш перспективних напрямків досліджень вважається використання в якості палива борогідриду натрію, а в якості електроліту – лугу.

AFC (Alkaline Fuel Cell) – лужні паливні елементи. В якості електроліту в лужних елементах використовується концентрований гідроксид калію (KOH) або його водний розчин, а основним матеріалом для виготовлення електродів є нікель. Лужні елементи значно (приблизно на порядок) поступаються PEMFC за питомою потужністю (густина струму в таких паливних комірках сягає 1



А/см<sup>2</sup>.), внаслідок чого їх габарити (при приблизно однакових характеристиках) значно більше. У традиційних лужних паливних елементах в якості палива повинен використовуватися чистий водень, а як окисник – чистий кисень. В цьому і полягає їх основний недолік – вміст у паливі або окисники домішок двоокису вуглецю (CO<sub>2</sub>) призводить до карбонізації лугу. В 1970-х роках для зменшення карбонізації електроліту в лужних паливних елементах знижувався робочий тиск і застосовувались газоочисники (вапно, гашене розчином їдкого натру).

На даний момент використовуються системи циркуляції електроліту з газоочисниками з натрового вапна. Це дозволяє знизити карбонізацію електроліту і сприяє відведенню надлишку тепла.

Система циркуляції дає наступні переваги:

- відсутнє пересихання комірок;
- покращене охолодження;
- карбонати легко видаляються з електроліту;
- градієнт концентрації OH<sup>-</sup> значно зменшений;
- в комірці не накопичуються бульбашки.

Перевагами всього класу паливних елементів з лужними електролітом є:

- низька собівартість виробництва;
- можливість використання більш дешевих нікелевих і срібних каталізаторів;
- швидкі реакції на катоді;
- абсолютна екологічна чистота гарячої води, одержуваної в якості відходів.

Недоліки лужних паливних елементів:

- карбонізація лугу при використанні повітря;
- високі вимоги до чистоти водню;
- малий ресурс.

До останнього часу технологія прямого окислення метанолу вважалася

					БМ61.03.205.1191	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

найперспективнішою для живлення портативної мікроелектроніки. Однак через проблеми DMFC (токсичність метанолу і висока вартість каталізаторів) був стимульований розвиток досліджень в області технології AFC.

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) – паливний елемент, в якому в якості електроліту використовується рідка фосфорна кислота. Такі паливні елементи виробляють теплоту чи електроенергію з ККД більше 50%, а робочі температури знаходять в межах 90...250 °С. PAFC застосовуються на великих стаціонарних об'єктах (до 11 МВт) Працюють ці паливні елементи на водні, однак, вимоги по його чистоті значно менш суворі, ніж в разі використання протонобійної мембрани в якості електроліту. У більшості випадків водень отримують з природного газу або біогазу. ККД по електроенергії оцінюється в 37 – 42% , а при використанні відведеної теплової енергії – 85%.

Пористі електроди виготовляються із суміші каталізаторів і вуглецево-полімерної зв'язки. Корозійна стабільність аноду досягається високотемпературною обробкою, при цьому корозія зменшується на два порядки при напрузі 0,8 В у 97% Н<sub>3</sub>РО<sub>4</sub> при температурі 190 °С і тиску 4,8 атм.

Переваги:

- низькі вимоги до чистоти палива;
- великий ресурс роботи.

Недоліки:

- наявність дорогоцінних металів в якості каталізатора;
- корозія електродів;
- довгий старт;
- низька густина струму та енергії.

Сегмент паливних елементів з фосфорною кислотою в якості електроліту вважається самим «зрілим» серед всіх технологій паливних елементів. PAFC стабільно розвивається, завдяки можливості використовувати водень з домішками. Сумарна потужність всіх світових установок, що функціонують на основі рідкої фосфорної кислоти, перевищує 75 МВт. Також ведуться дослідни

по застосуванню PAFC в автомобілях.

Світовим лідером з використання технології вважається американська компанія UTC Power (США), що працює також з іншими технологіями (PEMFC, MCFC). Серед провідних виробників варто відзначити компанії Південно-Азіатського регіону: Fuji Electric (Японія) і Korea Gas (Корея).

SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) – паливний елемент з твердим керамічним електролітом. Відмінність від раніше розглянутих видів полягає в значно вищих робочих температурах (700 – 1000 °C) і різноманітності використовуваного палива: природний газ, водень, пропан, біогаз, інші вуглецевмісні речовини. ККД електрохімічного перетворення – 50%, з урахуванням теплової енергії – до 80%. Основною сферою застосування цієї технології вважається виробництво джерел електричної і теплової енергії для різних приміщень. Також ведуться розробки систем промислового використання. SOFC широко застосовуються в якості первинних і портативних резервних джерел енергії великої ємності. Останнім часом ведуться розробки по використанню SOFC в автомобільній промисловості, проте, на відміну від паливних елементів на основі протонобмінних мембран мова йде тільки про допоміжні системи живлення, а не про основний силовий агрегат. Говорячи про великі об'єми енергії є досвід виробництва комерційних установок потужністю 1 МВт.

Деякі компанії-виробники: Acumentrics (США), Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL, Австралія), Mesoscopic Devices LLC (США), NanoDynamics Energy, Inc. (США), Rolls-Royce (США), Siemens Westinghouse (Німеччина).

6.MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) – паливний елемент на основі розплавленого карбонату (солі натрію, калію або літію). Паливні елементи даного типу так само, як і паливні елементи з твердим керамічним електролітом функціонують при високих температурах – 600 – 1000 ° C. Паливні елементи на основі розплавленого карбонату вимагають значного часу запуску і не дозволяють оперативно регулювати вихідну потужність, тому основний акцент

					БМ61.03.205.1191	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

в їх застосуванні – великі стаціонарні джерела теплової та електричної енергії. Вони відрізняються високою ефективністю перетворення палива – електричний ККД сягає 60%.

Широке промислове використання технології обумовлюють три чинники:

- електрохімічні процеси в MCFC не вимагають використання дорогих каталізаторів (застосовується нікель Ренія);
- в якості палива може використовуватися ціла низка натуральних і синтетичних палив;
- високі температури процесів не потребують додаткового «реформінгу» палива.

Недолік MCFC полягає в тому, що вони не можуть працювати на чистому водні, а високі температури і хімічні реакції призводять до корозії і прискорюють процес зносу елементів конструкції.

Деякі компанії-виробники: Ansaldo Fuel Cells SpA (Італія), FuelCell Energy (США), GenCell Corporation (США), MTU CFC Solutions GmbH (Німеччина).

### 1.3 Огляд аналогів паливних елементів

#### 1.3.1 Зарядний пристрій на основі водневого паливного елемента з гідридними утворювачами водню

Науково-дослідницька група, яка складається зі спеціалістів трьох організацій (Rohm, Aquafairy Corp., Кіотський університет), розробила легкий портативний водневий елемент. В ньому використовуються пластини з гідриду кальцію розміром 38x38x2 мм. При заповненні елемента водою гідрид вступає в реакцію і виділяє близько 4,5 л водню, з якого в свою чергу може бути отримано 5 Вт-год енергії. Цієї енергії достатньо, щоб підзарядити телефон. Також існують великі версії цих паливних елементів ємністю 400 Вт-год.

					БМ61.03.205.1191	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Суттєва перевага – простота і термін зберігання гідриду кальцію. Його можна зберігати 20 років за умови відсутності вологи. Експлуатувати дані паливні елементи можна в широкому, порівняно з літєвими акумуляторами, діапазоні температур.

До недоліків варто віднести необхідність оновлювати гідридні пластинки [5,6].

### 1.3.2 Зарядний пристрій «HydroFILL»

Компанія Horizon пропонує зарядний пристрій, як джерело енергії для якого використовується водень.

Гаджет складається з трьох частин. Ці елементи складають систему, яка працює за наступним алгоритмом: вироблення водню, заповнення паливних елементів воднем, трансформація водню в електричну енергію.

Перша частина системи, «HydroFILL», виділяє водень із води шляхом електролізу. Енергію на його проведення система черпає від сонячної батареї або електричної мережі .

Водень накопичується в мініатюрних резервуарах розміром з батарейку АА, які називаються Hydrosticks. Заповнення резервуару займає приблизно 4 години. Один Hydrostick може накопичити 12 Вт-год енергії. Більш детальні характеристики приладу наведені в табл. 1.3.

Переваги:

- автономність;
- компактність.

Недоліки:

- довготривала зарядка;
- залежність від погодних умов;
- висока вартість (\$650);

– доволі великі габарити і маса [7].

Таблиця 1.3. — Характеристики зарядного пристрою «HydroFILL»

Габарити (ШхДхВ)	145x153x28 мм
Маса	1,8 ± 5% кг
Номинальна потужність	≤23 Вт
Вхідна напруга	Постійний струм: 10 – 19 В

Продовження таблиці 1.3

Вода, що подається на вхід	Деіонізована або дистильована вода
Температура води	10 – 40 °С
Витрати води, мл/год	20 мл/год
Тиск водню на виході	0 – 3 МПа
Швидкість генерації водню	До 3 л/год
Чистота	99,99 %
Час заповнення одного картриджа	4 год

### 1.3.3 Зарядний пристрій «Powertrekk»

Powertrekk 2.0 складається з двох функціональних елементів: власне, паливна комірка і досить ємна акумуляторна батарея на 3800 мА/год. Таким чином, в будь-який момент пристроєм можна користуватися, дозволяючи підключати пристрої, яким потрібно зарядка, по USB.

Паливний елемент включає ємність з силіцидом натрію для продукування водню, який потім рекомбінує з киснем через протонобмінну мембрану. Ємність з силіцидом натрію замінна.

Рішення, реалізоване в Powertrekk, досить вдале, оскільки у користувача немає необхідності носити з собою ємність з чистим воднем. Крім того, акумуляторна батарея пристрою постійно заряджена, оскільки процес виробництва електрики безперервний (за умови змочування камери з силіцидом натрію водою).

Характеристики:

- габарити пристрою (ДхШхВ) – 128x66x47 мм;
- маса – 240 г;
- потужність – 6,5 Вт.

Переваги:

- велика потужність;
- портативність.

Недолік – необхідна періодична заміна картриджів з силіцидом натрію [8].

#### 1.3.4 Паливний елемент міліметрового масштабу

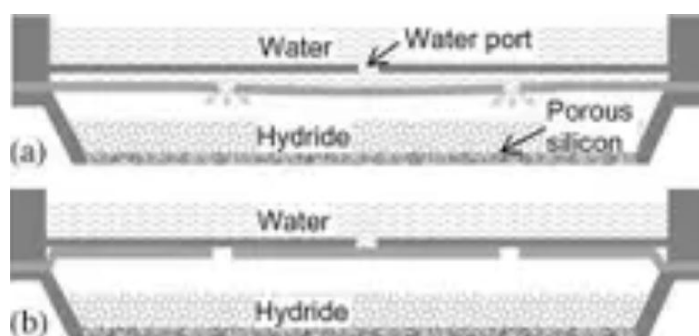


Рисунок 1.3 — Паливний елемент міліметрового масштабу

Вчені з університету Ілінойз в Ербана-Шампейн розробили найменші за габаритами паливні елементи. Їх розмір складає 3х3х1 мм.

Паливний елемент складається з 4-х елементів: мембрани з отворами, камери з гідридом металу, камери з водою, протонообмінної мембрани.

Коли в резервуар заливається вода вона потрапляє на гідрид металу виділяється водень і під дією надмірного тиску мембрана з отворами притискається до пластини, яка є дном резервуару з водою, тим самим блокуючи подальше надходження води. Протонобмінна мембрана вільно пропускає позитивно заряджені іони водню, а електрони потрапляють в зовнішнє коло.

Напруга такого елемента складає 0,7 В, а струм – 0,1 мА. При цьому запасу палива вистачає на 30 годин роботи.

Даний приклад є дуже цікавим і перспективним, оскільки мінімізація розмірів є чи не найважливішим напрямком розвитку технології живлення [9].

## Висновки до розділу 1

Принцип функціонування паливних елементів досить простий, що є однією з привабливих рис даного виду обладнання. Загальним чином робота паливного елемента описується рівнянням Нернста. За рахунок різниці концентрації речовини по різні боки електроліту виникає градієнт, іони рухаються через електроліт до катоду, а вільні електрони створюють струм в електричному колі.

Згідно з наведеною класифікацією одним з найбільш вигідних видів низькотемпературних паливних елементів є паливний елемент на основі протонообмінної мембрани. Його електроліт – мембрана є зручним у використанні, оскільки не потребує герметичного резервуару і не є небезпечним для людини. Мембрана займає менше місця, ніж рідкі електроліти, отже паливні елементи цього типу можуть бути меншими за габаритами і придатними для використання в портативній електричній та електронній техніці, а також в транспортних засобах.

В першому розділі наведено перелік паливних елементів невеликого розміру, які в своїй більшості призначені для заряджання портативної електронної техніки (мобільних телефонів, планшетів).

Зокрема хотілося б відмітити прилад під назвою «HydroFILL». Він є доволі компактним, хоч існують і його збільшені версії, які можуть відігравати роль генератора живлення при відключеннях електроенергії, при цьому живлячи досить велику кількість техніки. Також такі паливні елементи можуть використовуватись як польові джерела живлення.

Недоліком цих елементів можна вважати необхідність зберігати гідридні пластинки. Вони вельми чутливі до вологи, тому у рядового користувача це може викликати певні труднощі. Проте це все ж зручніше, ніж використання герметичних балонів зі стиснутим воднем.

					БМ61.03.205.1191	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Також дуже цікавим є паливний елемент міліметрового масштабу. Зазначені характеристики є дуже хорошими для настільки малих габаритів. Але не зазначено яким чином буде відбуватись обслуговування і заміна відпрацьованого гідриду.

					БМ61.03.205.1191	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ПАЛИВНОМУ ЕЛЕМЕНТІ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ БІОМЕДИЧНОЇ АПАРАТУРИ

#### 2.1. Математична модель паливного елементу на воді

Паливні елементи відносяться до хімічних джерел струму. Вони здійснюють пряме перетворення енергії палива в електрику минаючи малоефективні перетворення, що йдуть з великими втратами, процеси горіння. Це електрохімічний пристрій високоефективного «холодного» горіння.

Електрична енергія, що виробляється такими пристроями є екологічно чистою і по своїх електричних характеристиках задовольняє вимогам, що висуваються до джерел живлення радіoeлектронної індустрії.

Електроліз відбувається за рахунок енергії постійного струму, що підводиться ззовні, та енергії, що виділяється при хімічних перетвореннях на електроді. Таким чином, електроліз здатний протікати тільки в середовищах, які проводять електричний струм.

Енергія при електролізі витрачається на підвищення гіббсової енергії системи в процесі утворення цільових продуктів і частково розсіюється у вигляді теплоти при подоланні опорів в електролізері та інших ділянках електричного кола. Досліджуючи продукти, що виділяються в електроді, при електролізі кислот, основ і солей, встановили, що у катодів завжди виділяються метали та водень, а на аноді – кислотні залишки або гідроксильні групи, які потім піддаються подальшим змінам.

Розглянемо більш детально процеси, що протікають при електролізі. Відомо, що існують провідники першого роду, де струм тече за рахунок руху електронів, і провідники другого роду, де струм тече за рахунок руху іонів. Електрони вступають у взаємодію з іонами в місцях електричного ланцюга, де

провідник першого роду межує з провідником другого роду. Таким чином, відбуваються електрохімічні процеси.

Електрохімічні процеси, що протікають на електродах при електролізі, перш за все, будуть залежати від співвідношення електродних потенціалів відповідних електрохімічних систем. З кількох можливих процесів буде протікати той, здійснення якого пов'язане з мінімальною втратою енергії [4].

Перший закон Фарадея доводить, що маса  $m$  речовини, яка виділяється на електроді, прямо пропорційна електричному заряду  $q$ , що пройшов через електроліт:

$$m = k \cdot q = k \cdot I \cdot t, \quad (2.1)$$

де  $k$  – електрохімічний еквівалент речовини;  $q$  – електричний заряд;  $I$  – сила струму;  $T$  – час, протягом якого пропускається струм.

Коефіцієнт пропорційності  $k$  чисельно дорівнює масі речовини, яка виділяється при проходженні через електроліт одиничного електричного заряду, і залежить від хімічної природи речовини.

$$m = \frac{\mu}{zeN_A} I \Delta t,$$

$$m = \frac{\mu}{zF} I \Delta t, \quad (2.2)$$

де  $z$  – валентність атома (йона) речовини;  $e$  – заряд електрона,  $e = 1,062 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $F = eN_A$  – постійна Фарадея,  $F = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль.

Згідно другого закону електрохімічні еквіваленти різних речовин співвідносяться, як їх хімічні еквіваленти. Хімічним еквівалентом йона називається відношення молярної маси  $A$  йона до його валентності  $z$ . Тому електрохімічний еквівалент:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{z}. \quad (2.3)$$

Другий закон Фарадея записується в наступному вигляді:

$$m = \frac{MI\Delta t}{nF}, \quad (2.4)$$

де  $M$  – молярна маса даної речовини, що утворилася (проте вона не обов'язково виділилася, а могла вступити в яку-небудь реакцію відразу після утворення) в результаті електролізу;  $I$  – сила струму, А;  $\Delta t$  – час, протягом якого проводився електроліз, с;  $n$  – кількість електронів, що беруть участь в процесі, яка при достатньо великих значеннях сили струму дорівнює абсолютній величині заряду йона, який прийняв безпосередню участь в електролізі (окисленого або відновленого) [5].

Якщо балон з чистим киснем (рис. 2.1) з'єднати через кисневу твердо електролітну систему ( $\text{TeO}_2$ ) з балоном  $\text{H}_2\text{O}$  (пара), то виникне потенціал згідно рівнянню Нернста (1.4):

$$E_{\text{O}_2} = kT \ln \frac{100\%}{30\%}.$$

З іншої сторони, з'єднуємо балон чистого водню через твердо електролітну водневу систему ( $\text{TeH}_2$ ) з балоном того ж  $\text{H}_2\text{O}$  (пара), то отримаємо потенціал згідно рівнянню Нернста:

$$E_{\text{O}_2} = kT \ln \frac{100\%}{60\%}.$$

Потенціали  $E_{\text{H}_2}$  і  $E_{\text{O}_2}$  різнополюсові. При підключенні клеми 1 до клеми 4, а клеми 2 до клеми 3, електричне коло замкнеться зі сталим струмом. При цьому із балонів водню і кисню буде відкачуватись, відповідно, водень і кисень в середовище водяної пари.

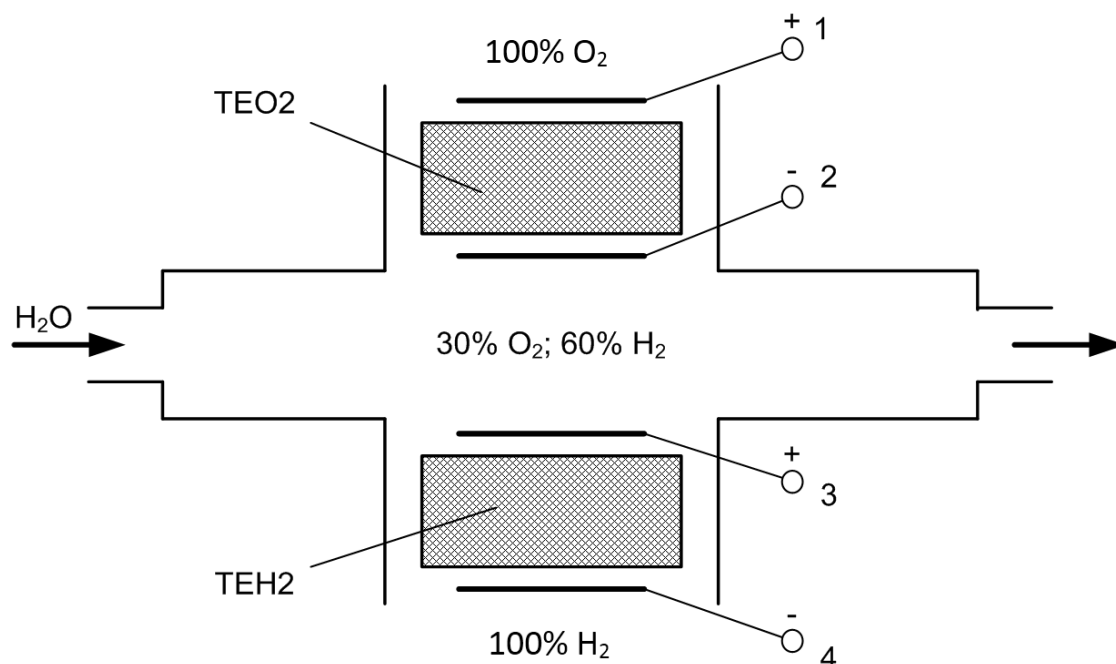


Рисунок 2.1 — Схема паливного елемента

Якщо схему (рис. 2.1) з'єднати з повітрям, то через  $\text{TEO}_2$  із середовища водяної пари в повітря буде відкачуватись кисень, а через систему  $\text{TEH}_2$  в повітря буде відкачуватись водень [40]. При цьому відповідні розрахунки потенціалів електродів мають вигляд:

$$E = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2}, \quad (2.5)$$

де  $E$  – напруга Нернста (В);  $\varphi_1, \varphi_2$  – потенціали електродів 1 і 2 (В);  $R$  – газова стала (8,31 Дж/(моль·К));  $T$  – температура (К);  $n$  – кількість електронів, що йде на іонізацію однієї молекули;  $F$  – постійна Фарадея ( $9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль);  $C_1, C_2$  – концентрації речовини, відповідно, на 1 і 2 електродах.

Тоді, підставляючи значення в (2.5) отримаємо:

потенціал 1:

$$\varphi_1 = \frac{RT}{4F} \ln 20 = 0,0644 \text{ (В)},$$

потенціал 2:

$$\varphi_2 = \frac{RT}{4F} \ln 30 = 0,0731 \text{ (В)},$$

потенціал 3:

$$\varphi_4 = \frac{RT}{4F} \ln 60 = 0,18 (B),$$

потенціал 4:

$$\varphi_4 = \frac{RT}{4F} \ln 0,3 = -0,05 (B).$$

Тоді різниця потенціалів, відповідно до включення, електродів:

$$\Delta\varphi(1,4) = 0,12 (B),$$

$$\Delta\varphi(1,4) = -0,1 (B).$$

Загальна напруга системи складе:

$$\Delta\varphi(1,2,3,4) = 0,22 (B).$$

Номінальний електричний струм в системі:

$$I_{\text{ном}} = \frac{\Delta\varphi(1,2,3,4)}{R} = 2,1 \cdot 10^{-3} (A),$$

де  $R = 100 \text{ Ом}$

## 2.2. Опис транспорту іонів через мембрани різних типів

В даній частині математично описується транспорт іонів через протонпровідні мембрани виробництва DuPont Nafion.

Масоперенос іонів водню в мембрані здійснюється за допомогою дифузії та конвекції. Враховуючи подібність структури мембрани до фракталу процес можна описати за аналогією з [24] рівнянням з частковою похідною за часом:

$$\frac{\partial^\gamma C_{H^+}}{\partial t^\gamma} + \nu^\gamma L^{1-\gamma} \frac{\partial C_{H^+}}{\partial x} = D_\gamma \frac{\partial^2 C_{H^+}}{\partial x^2}, \quad (2.6)$$

де  $C_{H^+}$  – концентрація протонів, моль/см<sup>3</sup>;  $\gamma$  – відношення об'єму пустот (пор) до загального об'єму зразка;  $v$  – швидкість конвективного потоку іонів, м/с;  $x$  – координата по товщині мембрани і паливному елементі, м;  $D_\gamma$  – модифікований коефіцієнт дифузії протонів, м<sup>2</sup>/с, розраховується згідно з рівнянням:

$$D_\gamma = D^\gamma S^{1-\gamma} (\chi \bar{\xi}^2)^{\gamma-1}, \quad (2.7)$$

де  $S$  – площа кластера, відкритого для протікання, м<sup>2</sup>;  $S_l$  – площа перетину міжкластерного каналу, м<sup>2</sup>;  $\xi$  – відносна концентрація «зубців» на каналі довжиною 1;  $\chi$  – відношення площі перетину міжкластерного каналу до площі перетину кластера

$$\chi = \frac{S_l}{S}, \quad (2.8)$$

Рушійною силою конвективного масопереносу протона через мембрану є різниця потенціалів (градієнт електростатичних напруг  $d\phi/dz$ ) і градієнт тисків  $dp/dz$ . Згідно рівнянню, запропонованому в [35], швидкість конвективного потоку може бути представлена наступним чином [11]:

$$v = \frac{k_\phi}{\mu} C_{H^+}^m \cdot F \frac{d\phi}{dz} - \frac{k_p}{\mu} \cdot \frac{dp}{dz}, \quad (2.9)$$

де  $k_\phi$  – електрокінетична проникність мембрани, м<sup>2</sup>;  $k_p$  – гідравлічна проникність мембрани, м<sup>2</sup>;  $\mu$  – в'язкість рідини в порах мембрани, кг/м · с;  $F$  – постійна Фарадея, Кл/моль;  $T$  – температура паливної комірки, К [11].

Для вирішення диференціальних рівнянь необхідні додаткові умови. Шукана функція, що позначається як концентрація протонів водню  $C_{H^+}$  є функцією часу і координат. Початкова умова, що характеризує її розподіл в

просторі в початковий момент часу буде мати наступний вигляд для рівняння (2.6):

$$C_{H^+}(t = 0; x) = C_{H^+}^0. \quad (2.10)$$

Граничні умови для рівняння (2.4) враховують утворення протонів в комірі на аноді, а також вихід заряджених частинок за рахунок реакції на катоді.

Ліва гранична умова:

$$\begin{aligned} -D_\gamma \frac{\partial C_{H^+}}{\partial x} \Big|_{x=0} + \nu^\gamma L^{1-\gamma} C_{H^+} \Big|_{x=0} &= w_1 \Big|_{x=0}, \\ w_1 &= k_1^0 \exp\left(\frac{\alpha_A F \eta_A}{RT}\right) C_{H_2O}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де  $w_1$  – швидкість утворення протонів по реакції на аноді, моль/м<sup>2</sup> · с;  $k_1^0$  – стандартна стала швидкості електрохімічної реакції на аноді, м/с;  $\alpha_A$  – коефіцієнт перенесення заряду на аноді;  $\eta_A$  – перенапруження на аноді, В.

Права гранична умова:

$$\begin{aligned} -D_\gamma \frac{\partial C_{H^+}}{\partial x} \Big|_{x=L} + \nu^\gamma L^{1-\gamma} C_{H^+} \Big|_{x=L} &= w_2 \Big|_{x=L}, \\ w_2 &= k_2^0 \exp\left(\frac{\alpha_A F \eta_A}{RT}\right) C_{H^+} C_{O_2}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

Для вирішення рівняння з частковою похідною по часу (2.6) використовувався чисельний метод, що був запропонований в [36].

Таким чином неявна різницева схема з використанням часткової похідної порядку  $0 < \gamma < 1$  для рівняння (2.5) приймає наступний вигляд:

$$\frac{C_j^{n+1} - \gamma C_j^n}{\Gamma(1-\gamma)^2 \Delta t^\gamma} + \nu^\gamma L^{1-\gamma} \frac{C_j^{n+1} - C_{j-1}^{n+1}}{\Delta x} = D_\gamma \frac{C_{j+1}^{n+1} - 2C_j^{n+1} + C_{j-1}^{n+1}}{\Delta x^2}, \quad (2.13)$$



Рівняння (2.13) показує як геометрія середовища змінює (уповільнює –  $\Gamma(1 - \gamma)^2$  і чисельник  $\gamma$  в лівій частині) процес масопереносу.

При  $\gamma = 1$   $\Gamma(1 - \gamma) (1 - \gamma) = \Gamma(1) = 1$ .

В таблиці 2.1 можна побачити характеристики мембран.

Таблиця 2.1 — Параметри протонпровідних мембран «Nafion»

Параметри	Nafion 115	Nafion 117
	T = 333 K	T = 333 K
$D_g, \text{м}^2/\text{сг}$	$2,65 \cdot 10^{-10}$	$2,64 \cdot 10^{-10}$
$K_1, \text{м/с}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
$K_2, \text{м/с}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$
$V_g, \text{м/сг}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$
$\eta_A, \text{В}$	0,095	0,095
$\eta_k, \text{В}$	0,065	0,064
$j, \text{мА/см}^2$	316	344
$I, \text{А}$	7,26	7,91

### 2.3. Затоплення пор катодного активного шару водою

Величину струму в підложці можна розрахувати по формулі [14]:

$$i = \sqrt{nFD \cdot D_{kn}c_0L \cdot i_0S_{in}} \frac{c}{c_0} \cdot e^{\frac{\eta}{2}} \cdot \tanh \left( e^{\frac{\eta}{2}} \cdot \sqrt{\frac{i_0S_{in}}{nFD \cdot D_{kn}c_0L}} \right), \quad (2.14)$$

де залежність струму обміну  $i_0$  (А/см<sup>2</sup>) від температури активного шару  $T_s$  має наступний вигляд:

$$i_0 = 10^{-8} \exp \left[ 8804 \left( \frac{1}{323} - \frac{1}{T_s} \right) \right]. \quad (2.15)$$

У формулі (2.14) число електронів, що беруть участь в електровідновлення кисню  $n = 4$ , число Фарадея  $F = 9.65 \cdot 10^4$  Кл/моль, ефективний кнудсеновський коефіцієнт дифузії, як зазначалося вище,  $D_{kn} =$

$1,50 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ , розчинність кисню в нафіоні при тиску  $p^* = 101 \text{ кПа}$ ,  $c_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ г-моль/см}^3$ , ребро модельного куба зерна підложки  $L = 10^{-5} \text{ см}$ , поверхню, на якій в зерні підложки йде електрохімічний процес  $S_{\text{in}} = 5,20 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$ , а величини наведеної розчинності кисню в нафіоні  $c/c_0$ , а також поляризації катоду  $\eta$  повинні бути визначені в наступних розрахунках [14].

Таблиця 2.2 — Залежність ефективного коефіцієнту дифузії кисню  $D$  від ступеню затоплення газових пор в зерні підложки  $g_w$

$g_w$	0	0,0117	0,0135	0,0578	0,0775	0,1174	0,1617	0,1878	0,1995	0,2347
$D \cdot 10^5$	1,50	0,596	0,390	0,202	0,151	0,0739	0,0344	0,025	0,019	0,00041

Розрахунок ефективного коефіцієнту дифузії  $D^*$ , який залежить від часу (процес заповнення пор водою не миттєвий):

$$D^* = \frac{D}{D_{kn}} D. \quad (2.16)$$

$D^*$  змінюється від 1 (води в зернах нема) до  $D^* = (4,1/1,5) \cdot 10^{-4}$  (пори повністю затоплені). Залежність істинного коефіцієнта дифузії  $D$  від ступеня заповнення пор водою наведена в таблиці 2.2 [14].

При  $g_w = 0,2347$  пори повністю заповнені водою. В формулі (2.14) потенціали  $E$  необхідно перевести в поляризацію  $\eta$ :

$$E \geq E^* \rightarrow \eta = \frac{1,05 - E}{0,026}, \quad (2.17)$$

$$E \leq E^* \rightarrow \eta = \frac{1,05 - 0,825}{0,026} + \frac{0,825 - E}{0,052}, \quad (2.18)$$

де  $E^* = 0,825$ ,  $V$  – потенціал точки перелому на поляризаційній кривій [14].

Приклад: якщо на фронтальній поверхні активного шару  $E = 0,6$ , то  $\eta = 225/26 + 225/52 = 12,98$ .

#### 2.4. Видалення води з пор активного шару шляхом випаровування

Трьохкомпонентна система (вуглецеві частинки з Pt, мембрана, газові пори, що дозволяють дифузію для парів води і газу) складна для аналізу, тому для її розрахунку було введено певні спрощення [14].

В результаті генерування струму на катоді (відновлення кисню до води, що протікає в зернах підложки) підвищується його температура. Температура в зернах підложки  $T_s$  буде вищою, ніж температура функціонування паливного елементу  $T$ . Оскільки теплопровідність води вища, ніж в суміші молекул водяної пари і кисню, можна з високим ступенем точності припустити, що вода в зернах підкладки зрівняється по температурі із зернами підложки ( $T_s$ ), а температура в порах-пустотах (транспортна частина структури активного шару), які транспортують в активний шар кисень, буде нижчою, ніж  $T_s$ .

Отже створюються умови для випаровування води з поверхні рідини. А пари з газових пор будуть виділятися шляхом дифузії. Всі подробиці, пов'язані з отриманням величини струму випаровування  $i_s$  наведені в [37]. Для  $i_s$  (в А) маємо вираз [14]:

$$i_s = 0.002 \sqrt{\beta} \frac{F D_s L}{R} \left( \frac{P_s}{T_s} - \frac{P}{T} \right) \tanh \sqrt{\beta}, \quad (2.19)$$

де  $T_s > T$  – підвищення температури активного шару, а  $P_s$  і  $P$  – тиски насичених парів води, що відповідають цим температурам. Значення тисків виражаються в кПа.

Таблиця 2.3 — Залежність величина параметра  $\beta$  від ступеня затоплення пор зерна підложки водою  $g_w$

$g_w$	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,23
$\beta$	0	0,421	0,999	1,594	2,159	2,65	3,036	3,282	3,348	3,18	2,708,	1,709	0

Таблиця 2.4. — Залежність ефективного коефіцієнта дифузії водяного пару  $D_s$  см<sup>2</sup>/с від ступеню затоплення пор зерна підложки водою  $g_w$

$g_w$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
$D_s 10^5$	2,24	1,712	1,253	0,8144	0,4655	0,2493	0,1318	0,07855	0,03346	0

Параметр  $\beta$ , що входить до виразу (2.19) і залежить від ступеня затоплення пор підложки водою  $g_w$  і визначається за допомогою табличних даних (табл. 2.3). Залежність ефективного коефіцієнта дифузії парів води  $D_s$  від ступеня затоплення пор зерна підложки водою  $g_w$  представлена в табл. 2.4.

## 2.5. Фільтрація води в зернах підложки

В зернах підложки потік води рухається від поверхні вуглецевого кластера, на якому знаходяться мікрочастинки платини і де відбувається електротрохімічний процес, до поверхні зерна підложки. Вода рухається крізь пористе середовище, утворене кластером, що складається з дрібних частинок мембрани. При цьому газові пори цього кластера можуть бути частково або навіть повністю заповнені вологою. Зазвичай фільтрацію води прийнято описувати за допомогою закону Дарсі [21 – 23]. Для зерен підложки, враховуючи, що в них існує перепад тисків насичених парів води  $P_s - P$ , отримаємо наступний вираз [14]:

$$v = k_f g_w \frac{P_s - P}{L}, \quad (2.20)$$

де  $v$  – швидкість потоку води,  $L$  – довжина ребра зерна підложки  $g_w$  – ступінь затоплення зерна підложки ( $0 \leq g_w \leq 0.2347$ ),  $k_f$  – коефіцієнт пропорційності в законі Дарсі. Якщо  $Q = vS$  – кількості витікання води,  $S = L^2$  – площа грані зерна підложки, то за час  $\Delta t$  витікає такий об'єм води  $\Delta Q = k_f g_w L(P_s - P)\Delta t$ . Нехай струм витікання води з зерна підкладки є  $iv$ ,  $A$ . Тоді за час  $\Delta t$  кількості витікання води  $\Delta Q$  можна уявити як [14]

$$\Delta Q = 9 \frac{iv}{F} \Delta t.$$

(2.21)

В результаті отримаємо для струму фільтрації наступний вираз:

$$iv = 10^{-3} k_f F L g_w \frac{P_s - P}{L}. \quad (2.22)$$

Різницю тисків необхідно виражати в кПа.

Таким чином, враховуючи фільтрацію води з підложки струм  $j$  (А) в зернах матиме наступний вигляд:

$$j = i - is - iv. \quad (2.23)$$

На жаль, константу  $k_f$  в законі Дарсі для зерен підкладки точно розрахувати досить важко. По-перше, тому, що відсутнє достатньо точне представлення про особливості складної структури кластера мембрани в зерні підкладки і про те, як в його порах при наявності газової пористості (неповне затоплення газових пор водою) розподілена вода [14].

По-друге, тут має місце фільтрація води в ультратонких каналах. Але відомо [21-23], що при малих швидкостях фільтрації в надтонких каналах виникають порушення закону Дарсі. Їх пов'язують з проявом сил молекулярної взаємодії частинок  $H_2O$  і середовища (пористого матеріалу), в якій і відбувається фільтрація води.

В силу цих причин доводиться варіювати величину  $k_f$ , задаючи для неї розумні значення в районі, як показують попередні оцінки, величини  $k_f \sim 10^{-7}$ .

Висновки до розділу 2

					БМ61.03.205.1191	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

В другому розділі описано принцип роботи дослідного паливного елемента, наведено його принципову схему та деякі розрахунки.

Також описується вплив геометричних показників середовища на транспорт іонів через мембрану. Зокрема показано як на іонний транспорт впливає кількість пор в мембрані.

Окрім того в другому підрозділі показано вплив затоплення пор активного шару на дифузію крізь пори і, відповідно, на струм, який генерується системою.

Також було описано механізм видалення води з пор активного шару шляхом випаровування і параметри, які на це впливають.

					БМ61.03.205.1191	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТУ ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

### 3.1. Дослідження властивостей різних видів активного шару

В області малих щільностей струму спостерігається кореляція для трьох типів електродів (рис. 3.1), які досліджені як катоди електролізера [40]. Однак у випадку великих щільностей струму для каталізатора, попередньо спеченого з фторопластом, величини перенапруги, отримані в експерименті, значно вищі за розрахункові. Вочевидь, при високих щільностях струму відбувається погіршення живлення гідрофобізованих каталітичних центрів реагентом – протонами, які переносяться через мембрану в гідратизованому вигляді [40].

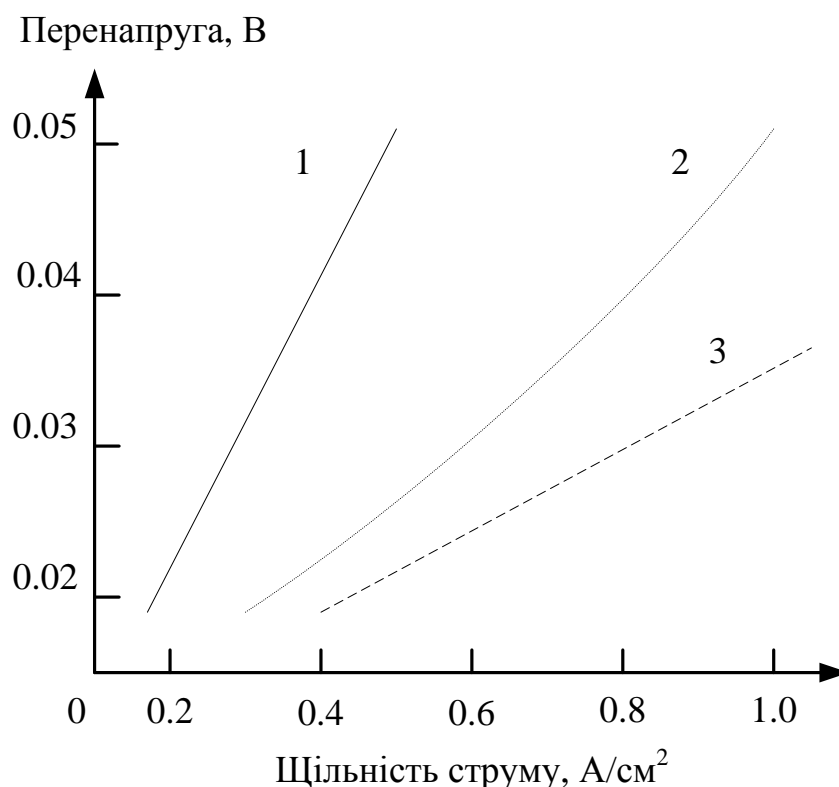


Рисунок 3.1 — Розрахункові вольт-амперні залежності для різних каталітичних шарів катоду електролізера.

1 – Pt-чернь, спечена з частинками фторопласту; 2 – Pt-чернь в матриці, приготованої із суміші розчину іонообмінного полімеру і фторопласту; 3 – Pt в матриці іонообмінного полімеру.

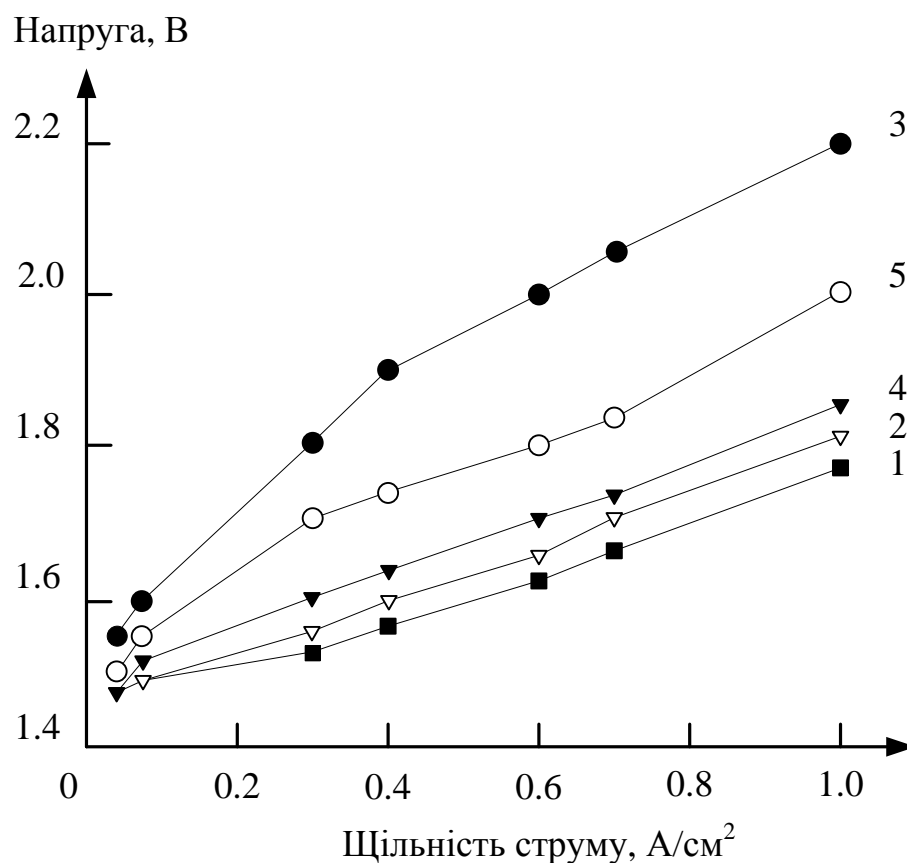


Рисунок 3.2 — Вольт-амперні криві електролізного осередку паливного елементу при 85°C для різних катодів.

1 – Pt-чернь в матриці іонообмінного полімеру на вуглеграфітовій тканині; 2 – Pt-чернь в матриці, що приготовлена змішуванням розчину іонообмінного полімеру і порошку фторопласту; 3 – Pt-чернь, попередньо спечена з частинками фторопласту в матриці іонообмінного полімеру на вуглеграфітовій тканині; 4 – Pt-чернь в матриці іонообмінного полімеру на гідрофобній вуглеграфітовій тканині; 5 – суміш Pt та Ir в матриці іонообмінного полімеру на вуглеграфітовій тканині.

З використанням спеціальних технологій виконання електродів експериментальні вольт-амперні характеристики паливного елементу мають вигляд (рис. 3.3)[40].



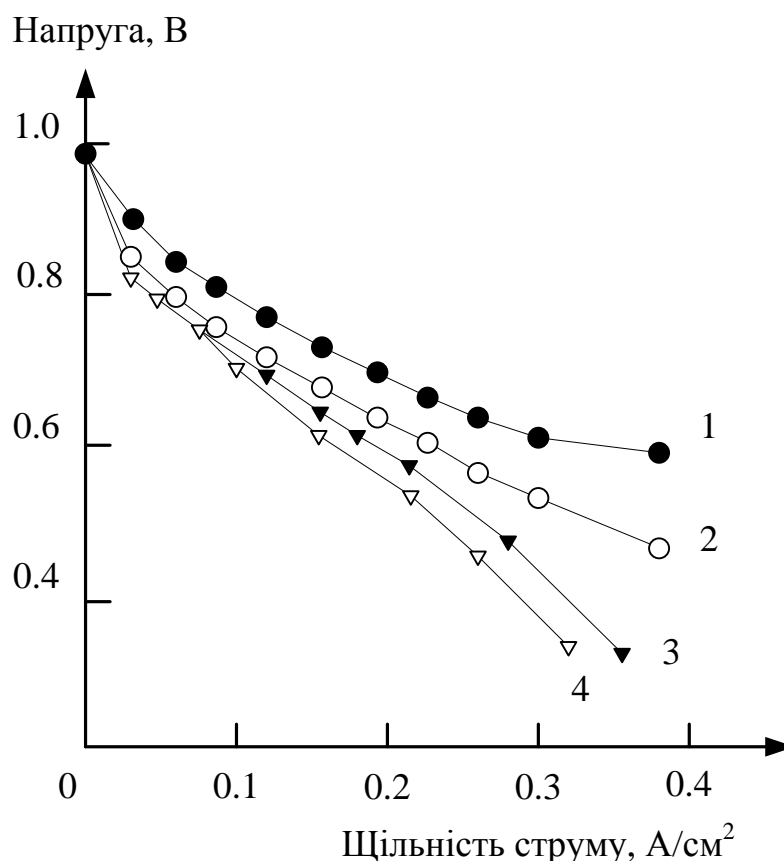


Рисунок 3.3 — Вольт-амперні характеристики паливного елемента при 75°C з постійним катодом (платина на гідрофобній вуглецевій тканині) і різними каталітичними шарами.

1 – Pt на гідрофобній вуглеграфітовій тканині; 2 – Pt чернь на гідрофобній вуглеграфітовій тканині; 3 – Pt-чернь на пористому титані; 4 – Pt-Ir-каталізатор на пористому титані.

При секційній схемі побудові електродної системи для різних щільностей струму можна отримувати необхідні вольт-амперні характеристики системи паливного елемента шляхом зміни кількості секцій. В таблиці приведені електричні характеристики паливного елемента по методиці [11] для різної кількості секцій з робочою площею електроду (платина на вуглецевій тканині) 0,25 см<sup>2</sup>.

Таблиця 3.1 — Характеристики паливного елемента з різною кількістю секцій

Щільність струму,	Напруга, В	Сумарний струм на електродах, А				
		1	2	4	6	8

A/см <sup>2</sup>		секція	секції	секції	секцій	секцій
Продовження таблиці 3.1						
0	1,0	0	0	0	0	0
0,1	0,8	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2
0,2	0,7	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
0,3	0,65	0,075	0,15	0,3	0,45	0,6
0,4	0,6	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8

Блоки паливного елемента представлені на рисунку 3.4 [40]:

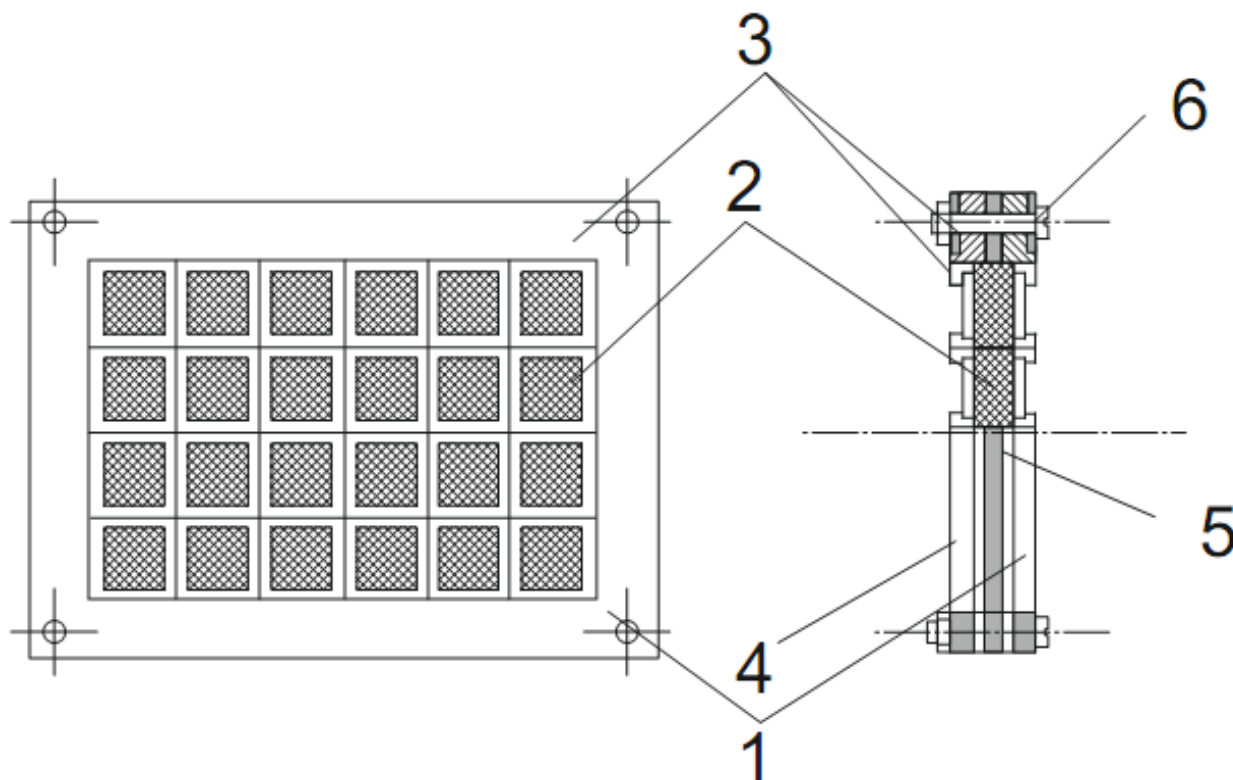


Рисунок 3.4 — Мембранно-електродний елемент мембранно-блокового типу  
 1 – металевий нижній каркас; 2 – мембранні блоки; 3 – електроди; 4 – металевий верхній каркас; 5 – ізоляційна прокладка; 6 – діелектричне кріплення.

Іншим технічним рішенням мембранно-електродного блоку є конструкція з цільною мембраною (рис. 3.5).

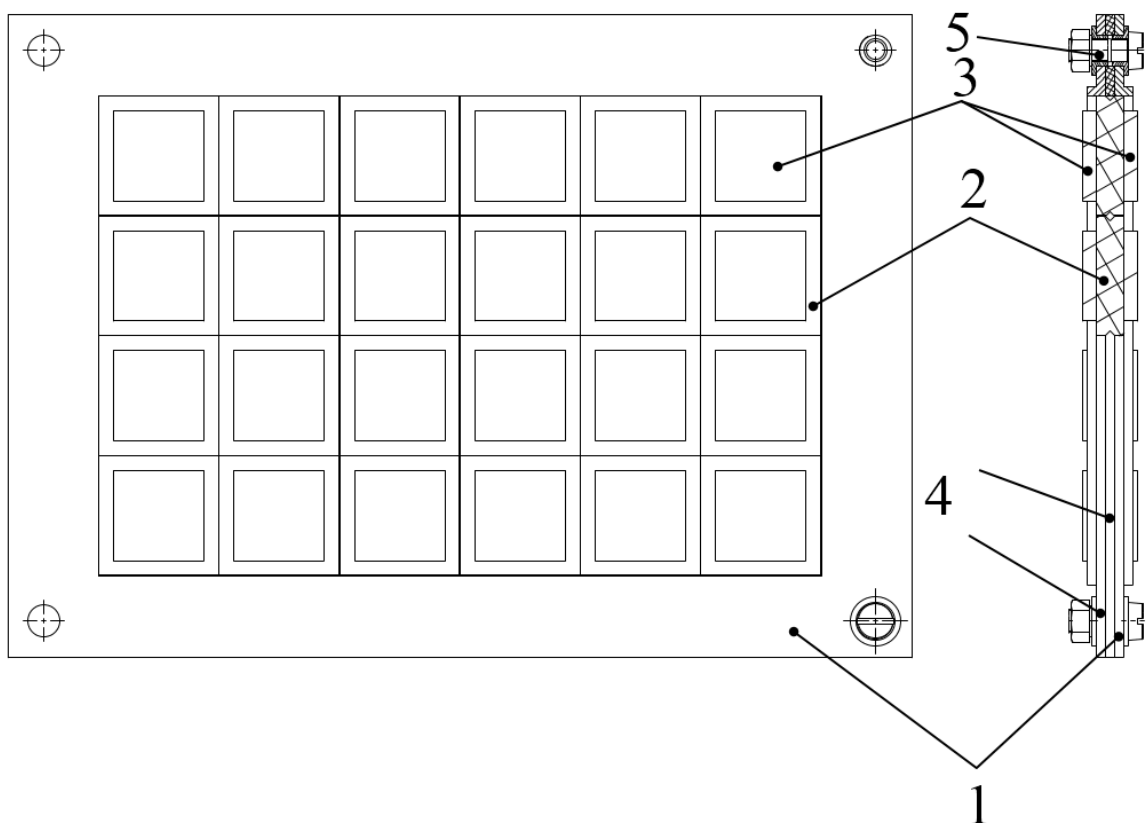


Рисунок 3.5 — Мембранно-електродний елемент з суцільною мембраною  
1 – нижній металічний каркас; 2 – мембрана; 3 – електроди; 4 – верхній металевий каркас; 5 – діелектричне з'єднання.

Технологія складання мембранно-електродного блоку наведена на рис. 3.6.

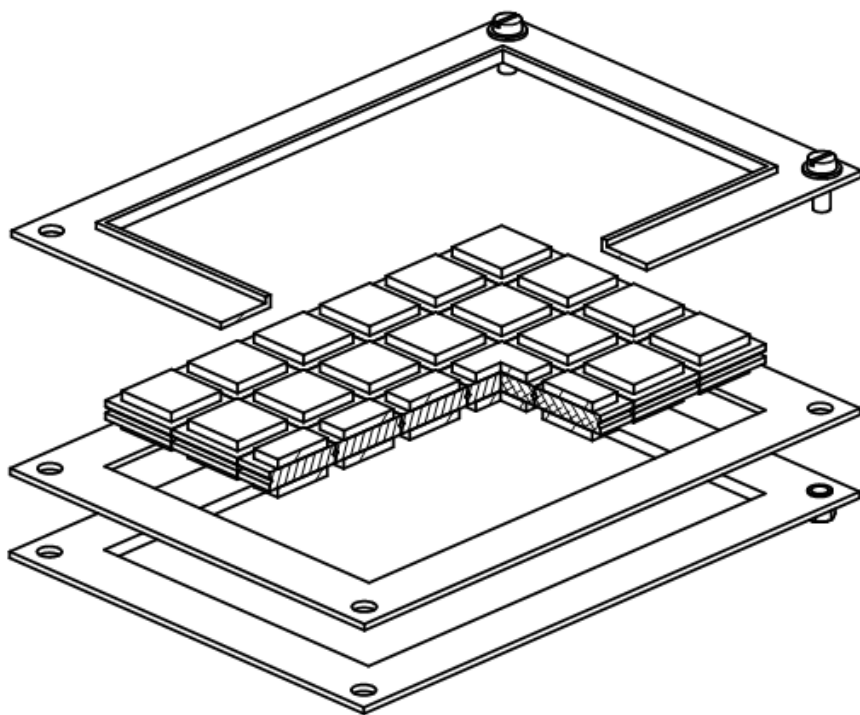


Рисунок 3.6 — Порядок складання мембранно-електродного блоку.

### 3.2 Технологія виготовлення паливного елементу

Перелік складових частин прототипу наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Матеріали прототипу паливного елементу

№	Назва елементу	Застосування в паливному елементі	Параметри
1	Силіконова трубка	Протонобмінна мембрана	зовнішній діаметр – 12 мм; довжина – 65 мм; товщина – 1 мм.
2	Платинова чернь	Каталізатор	маса – 5 г
3	Бязь	Основа активного шару	Для зовнішнього електроду: – довжина – 50 мм; – ширина – 26 мм. Для зовнішнього електроду: – довжина – 50 мм; – ширина – 19 мм.
4	Платиновий дріт	Електрод, струмознімач	діаметр – 0,5 мм довжина – 200 мм
5	Канцелярський папір	Елемент кріплення	довжина – 50 мм; ширина – 20 мм.
6	Нитки	Елемент кріплення активного шару	достатня кількість для надійного скріплення
7	Трубка пластмасова (велика)	Корпус	зовнішній діаметр – 12 мм; довжина – 80 мм; товщина – 1 мм.
8	Трубка пластмасова (мала)	Ємність для води	довжина – 70 мм; зовнішній діаметр – 6 мм; товщина – 0,5 мм.
9	Гумова вставка	Ущільнювач	зовнішній діаметр – 12,5 мм; внутрішній діаметр – 5,5 мм; товщина – 5 мм.
10	Пластмасова вставка з отвором в центрі	Кришка	внутрішній діаметр – 11,5 мм; довжина – 10 мм; товщина – 1 мм.
11	Силіконовий стержень	Заглушка для мембрани	діаметр – 7 мм;
12	Шпилька М3	Виведення зовнішнього електроду, кріплення	кількість – 1 шт.
13	Гайка М3	Кріплення	кількість – 2 шт.
14	Шайба М3	Кріплення	кількість – 3 шт.

Технологія складання паливного елементу.

- В ємність для змішування налити 10 мл етилового спирту, додати платинову чернь і перемішати.
- Розмістити на силіконовій трубці платиновий дріт по схемі на

3. Підготувати основу для створення активного шару.
  4. Виконати необхідну перфорацію в пластмасовій трубці по всій довжині.
  5. Змочити в суміші платинової черні та етилового спирту основу активного шару внутрішнього електроду до повного насичення платиновою черню.
  6. Обмотати пластмасову трубку з отворами і, накладений на неї внутрішній електрод з платинового дроту, тканиною з платиновою черню.
  7. За допомогою нитки щільно зафіксувати тканину на пластмасовій трубці.
  8. Знежирити силіконову трубку за допомогою етилового спирту.
  9. Зафіксувати пластмасову трубку з каталітичним шаром в мембрані.
  10. Змочити в суміші етилового спирту і платинової черні тканину для зовнішнього електроду до повного насичення платиновою черню.
  11. Обгорнути силіконову трубку тканиною з платиновою черню.
  12. Покрити поверхню зовнішнього активного шару канцелярським папером, попередньо розмістивши на ній зовнішній електрод.
  13. Закріпити папір на поверхні вуглецевої тканини за допомогою нитки.
  14. Вільний від електродів кінець силіконові трубки закупорити за допомогою силіконового стержня.
  15. Закріпити платиновий дріт катоду в пластмасовій заглушці за допомогою гвинта шайб і гайок: затиснути дріт між двома шайбами, а зверху закрутити одну гайку. З іншого боку заглушки вдягнути шайбу на гвинт і притиснути гайкою.
  16. Вставити електрохімічну частину в пластмасову трубку.
  17. Нанести на зовнішню поверхню гумової ущільнюючої вставки клей і закріпити в трубці, попередньо вивівши анод.
- Підготовка паливного елементу до роботи.
1. Зафіксувати паливний елемент на підставці.

2. За допомогою шприца або піпетки налити воду всередину внутрішньої пластмасової трубки.

3. Очікувати поки тканина повністю буде змочена водою і напруга перестане зростати.

### 3.3 Розробка дослідного зразка паливного елементу

Протоно провідні мембрани дозволяють реалізувати процес електролізу води в низькотемпературному режимі. Блок відкачування водню з води при цьому можна використати як окремий пристрій.

З метою практичного використання результатів досліджень був розроблений пристрій – низькотемпературне електрохімічне джерело живлення низької потужності.

Джерело живлення на основі низькотемпературного електролізу води

Паливні елементи відносяться до хімічних джерел струму. Це електрохімічний пристрій, що виробляє електроенергію безпосередньо без втрат на перетворення між видами енергії. Електроліз відбувається за рахунок енергії, що виділяється при хімічних перетвореннях на електроді.

Протонобмінні мембрани дозволяють реалізувати електролізу при порівняно низьких температурах (до 100 °C). Це вигідно, оскільки зникає потреба реалізовувати масивні системи тепловідведення та теплоізоляції. Окрім того більш низькі робочі температури роблять пристрій безпечнішим у використанні.

Принципова схема паливного елементу на воді з силіконовою протон обмінною мембраною наведена на рис. 3.10. Креслення прототипу можна знайти в додатку А, рис. А.3.

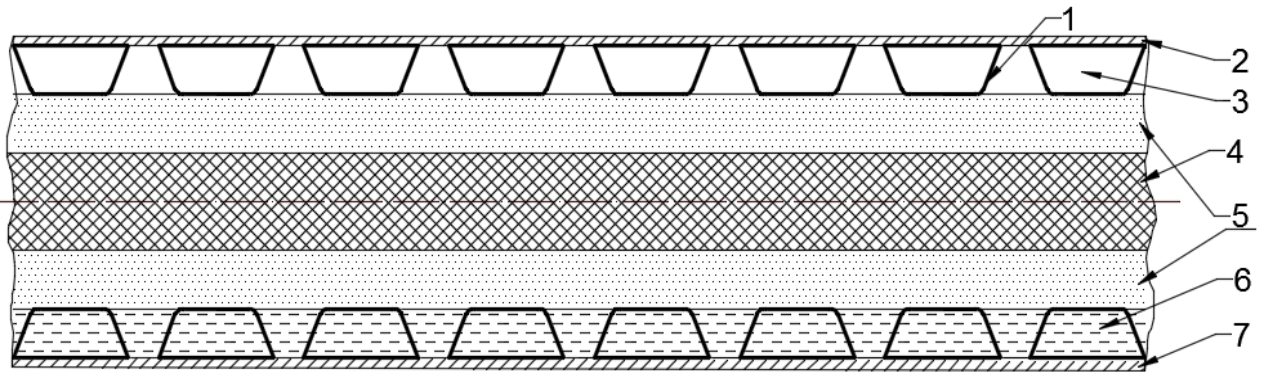


Рисунок 3.7 – Конструкція паливного елемента в розрізі: 1 – струмознімач; 2 – анод; 3 – повітря; 4 – протонпровідна мембрана; 5 – активний шар; 6 – вода; 7 – катод.

Згідно рівняння Нернста (1.4) на електродах водневого елемента виникає е.р.с.:

$$E = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2},$$

де  $C_1 = 66,6 \%$  – об'ємна частка водню у воді;  $C_2 = 0,3 \%$  – об'ємна частка водню у повітрі.

На першому електроді виникає потенціал  $\varphi_1$ :

$$\varphi_1 = \frac{RT}{nF} \ln 66,6 = 0,05 (B).$$

На другому електроді виникає потенціал  $\varphi_2$ :

$$\varphi_2 = \frac{RT}{nF} \ln 0,3 = -0,02(B).$$

Тоді напруга на електродах 2 і 3, як різниця потенціалів складає:

$$E_{H_2} = \varphi_1 - \varphi_2 = 0,053 + 0,015 = 0,07$$

Можливі й інші приклади виконання паливного елемента, які були зазначені раніше. Ще одним прикладом може бути зміна катоду та аноду місцями. Так при подачі води не на внутрішній електрод, а на зовнішній з'являється можливість просто занурювати певну кількість паливних елементів (блок) у резервуар з водою.

### 3.4 Джерело живлення на основі низькотемпературного електролізу води

Експериментальний прототип паливного елементу на воді можна побачити на рисунках 3.8 та 3.9. На них він зображений у відкритому стані і тому можна побачити більшість його деталей.

На рисунку 3.10 наведено фотографію вимірювання напруги на електродах прототипу. Видно, що значення напруги дорівнює 322 мВ. Це значення не є точним і коливається в деяких межах, оскільки напруга на пряму залежить від якості зиочування водою каталітичного шару.

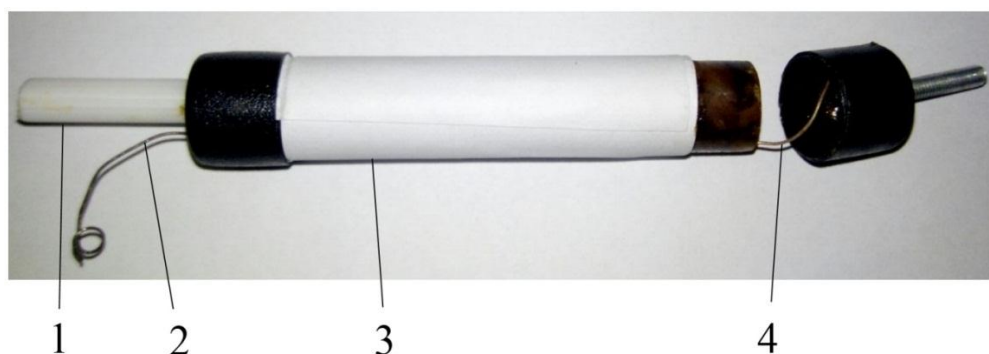


Рисунок 3.8 — Дослідний зразок паливного елемента у відкритому стані (вид у профіль): 1 – внутрішня пластмасова трубка-резервуар; 2 – внутрішній електрод (анод); 3 – корпус; 4 – зовнішній електрод (катод)

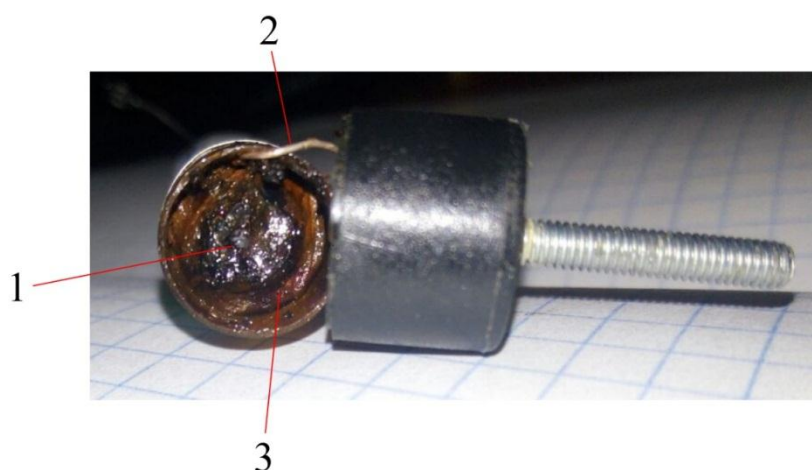


Рисунок 3.9 — Дослідний зразок паливного елемента у відкритому стані (вид з торця): 1 – заглушка; 2 – зовнішній електрод (катод); 3 – силіконова мембрана



### Переваги:

- відсутність рухомих частин;
- простота експлуатації та технічного обслуговування;
- малі розміри і вага;
- висока надійність.

### Технічні характеристики:

- напруга живлення: 0,9 В.
- робочий струм: 15-20 мкА.
- робоча температура: 293 К.

### Налаштування перед роботою

- розпакувати виріб;
- підготувати чисту воду;
- встановити виріб на робоче місце;
- підключити виріб до вольтметра;
- за допомогою піпетки залити воду у внутрішню трубку до повного занурення внутрішнього електроду (до появи води на поверхні внутрішньої трубки).

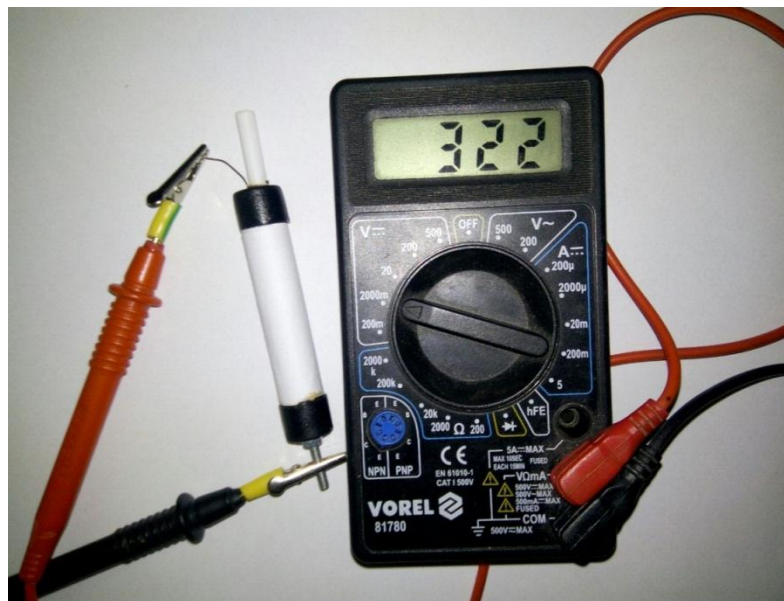


Рисунок 3.10 — Напруга на паливному елементі

Застереження: воду заливати обережно не допускаючи її проливу на зовнішній електрод.

Інструкція:

- витримати 1 – 1,5 хв (для повного зволоження внутрішнього електроду);
- виміряти напругу на електродах (вона повинна відповідати зазначеному в технічних характеристиках значенню);
- підключити виріб до робочих контактів;
- виріб готовий до роботи.

### Висновки до розділу 3

В третьому розділі наведено результати експериментів з різними видами каталітичних шарів та катодів для паливного елемента на воді. З графіків видно, що найбільш ефективною основою для активного шару є вуглеграфітова тканина. Це досягається за рахунок великої питомої площі.

Було розглянуто матеріали для прототипу паливного елемента. Вибір матеріалів обумовлений їх доступністю й адекватними при цьому характеристиками.

В другому підрозділі наведено принципову схему джерела живлення і спосіб виготовлення прототипу. Технологія є доволі простою, проте вона далека від промислової і може бути вдосконалена при зміні форми та об'єднанні в блоки. Такі схеми вигідні з точки зору простоти конструкції і підвищення надійності: при виході з ладу одного блоку його можна просто замінити на новий.

Таким чином при застосуванні мембрани у вигляді листа великої площі з'являється можливість виконати потужніший паливний елемент в меншому

					БМ61.03.205.1191	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

корпусі. А при застосуванні пресування вдасться виконати електрод і активний шар як одну деталь, яка прикріплюється до мембрани.

В четвертому підрозділі наведено матеріали, які були застосовані для виготовлення прототипу, інструкцію виготовлення, а також його фотографії та технічні характеристики.

Окремо варто виділити важливу роль основи активного шару. В даному випадку вона виконана з бязі. Перспективним є застосування вуглецевих матеріалів: тканин, активованого вугілля, нанотрубок. На ефективність протікання реакцій безпосередній і вагомий вплив має каталізатор і, відповідно, площа його взаємодії. При використанні матеріалів з високою питомою площею поверхні можна досягнути значно вищих характеристик.

					БМ61.03.205.1191	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 4

### ЗАСТОСУВАННЯ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТА НА ВОДІ В МЕДИЦИНІ

#### 4.1 Можливі застосування паливного елементу в медичних приладах

Портативність і компактність приладів останнім часом стала дуже важливим фактором. Виробники будь-яких приладів намагаються зробити їх меншими, більш економними та легшими. Найбільш явно цей принцип модернізації техніки прослідковується в електроніці.

Найбільш популярне рішення для портативних приладів – акумулятори. Вони зручні, а технології їх виробництва давно освоєні й покращуються з кожним роком, але навіть найбільш популярним з них – літій-іонним притаманний ряд недосконалостей:

- тривалий процес заряджання;
- зниження ємності при низьких температурах;
- обмеженість кількості циклів заряджання-розряджання;
- проблеми з утилізацією;
- існує небезпека займання або вибуху;
- в якості електроліту використовуються розчини лугів або кислот, що при порушенні цілісності оболонки може становити певну небезпеку.

Для приладів, які живляться малими напругами і споживають малі потужності часто більш розповсюдженим і вигідним є застосування батарейок. Вони дешеві, прості у використанні, доволі безпечні за умови правильного використання, а купити їх можна ледве не кожному магазину.

Такі елементи живлення також мають певні недоліки:

- вони одноразові;
- при фізичному пошкодженні корпусу можуть бути небезпечними;
- зазвичай на виході мають не дуже високу потужність, тому їх використання в приладах великої потужності незручне та економічно

невигідне.

На даний момент перспективним варіантом заміни акумуляторів і батарейок є паливні елементи. Їх класифікація була наведена в першому розділі. Проте далеко не всі види паливних елементів є зручними для використання в медичній техніці, особливо в портативній.

Лужні паливні елементи. Працюють при відносно низьких робочих температурах, але в якості електроліту використовується луг, який є не зручним для використання в портативній техніці. Окрім того порушення герметичності резервуару з електролітом може становити загрозу як для функціонування паливного елемента, так і для безпеки людей, що знаходяться поруч. Лужні елементи мають не дуже високі показники питомої потужності, внаслідок чого їх габарити суттєво більші, ніж у випадку інших паливних елементів.

Ще одним суттєвим недоліком лужних паливних елементів є чутливість до вмісту у паливі або окиснику домішок двоокису вуглецю. Для усунення цього недоліку застосовуються газоочисники, що безумовно ускладнює систему і збільшує її габарити.

Паливний елемент, в якому в якості електроліту використовується рідка фосфорна кислота. Робочі температури знаходять в межах 90...250 °С, тобто є не дуже низькими, але теплоізоляцію можна забезпечити при і при цьому зберегти доволі невеликі габарити пристрою. Паливні елементи на основі фосфорної кислоти використовуються здебільшого на великих установках, оскільки їх виготовлення при збереженні невеликих габаритів є проблемною задачею через низьку щільність енергії і необхідність підтримання доволі високого тиску в робочій зоні.

Паливний елемент з твердим керамічним електролітом. Робоча температура знаходиться в межах 700...1000 °С. Паливо, що може використовуватись може бути самим різноманітним: природний газ, водень, пропан, біогаз, інші вуглецевмісні речовини. Такий широкий спектр видів палива є великою перевагою перед іншими видами, але дуже високі

					БМ61.03.205.1191	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

температури обмежують його використання при малих габаритах, а також підвищуються небезпеку при експлуатації.

Паливний елемент на основі розплаву карбонату. Діапазон робочих температур – 600...1000 ° С. Паливні елементи на основі розплавленого карбонату вимагають значного часу запуску і не дозволяють регулювати вихідну потужність швидко, тому для використання в медичній техніці вони підходять погано хоч і мають електричний ККД близько 60%.

Паливний елемент з полімерною протонобмінною мембраною. В якості електроліту в таких паливних елементах використовується мембрана з полімеру (найчастіше Nafion або подібні мембрани). Паливо – чистий водень (допустимий вміст окису вуглецю – 10 – 100 мг/кг).

Ці елементи працюють в доволі низьких температурах – до 100 °С, мають високу щільність енергії, можуть швидко змінювати вихідну потужність, що є безумовними перевагами цього виду перед в контексті використання в медичній портативній техніці. Проте недолікам таких паливних елементів є використання чистого водню, який важко зберігати.

Для усунення цих проблем було вирішено використати воду в якості джерела водню і замінити мембрану типу Nafion на силіконову. Відпадає необхідність піклуватись про збереження палива, а силіконова мембрана стабільно працює в умовах сильного зволоження – не розбухає і не розшаровується на відміну від Nafion.

Найбільш перспективним в області медицини можна вважати використання такого паливного елемента в якості джерела живлення для електрокардіографів, тонометрів, апаратів штучного кровообігу та інших приладів відносно невеликої потужності в умовах неможливого підключення до стандартної мережі, або в якості резервного джерела електроенергії.

Окремо варто виділити можливість забезпечення функціонування необхідної медичної та допоміжної апаратури в польових умовах, наприклад, під час військових дій, або під час проведення рятувальних операцій. Зазвичай

для живлення медичного устаткування в умовах відсутності мережі 220 В здійснюється за допомогою генераторів або основних двигунів техніки. Використання паливних елементів в якості основного або резервного джерела живлення дає можливість скоротити кількість палива, яке споживається генераторами.

#### 4.2 Схема підключення апаратури розрахованої на живлення від мережі 220 В до паливного батареї паливних елементів з меншою напругою

Для застосування паливних елементів в якості основного або резервного джерела енергії для медичної апаратури в умовах відсутності доступу до мережі 220 В зручно використовувати схеми перетворювачів (інверторів) 12/24 – 220 В. Це дає змогу зменшити габарити батареї елементів живлення а також забезпечує можливість підключення від бортової мережі автомобіля.

Схем інверторів існує дуже велика кількість. Вони відрізняються потужністю, формою змінного струму на виході, елементною базою і, відповідно, вартістю. В даній роботі наведено просту схему інвертора потужністю 500 Вт. Такої потужності достатньо, щоб жити тонометр і ЕКГ або навіть більш потужну техніку, наприклад невеликий гемоаналізатор, портативний доплерівський сканер або навіть апарат штучного кровообігу.

Схема інвертору та друкована плата зображені на рис. А.1, А.2 (додаток А), відповідно. Генератор прямокутних імпульсів зібраний на мікросхемі D1. Частота на його виході рівна 200 Гц (діаграма А на рис. 4.1). З виводу 8 мікросхеми D1 імпульси поступають на дільник частоти, зібраний на елементах D2:А, D2:В. В результаті цього на виводі 6 елементу D2:А частота дорівнює 100 Гц (діаграми В), а на виводі 8 елементу D2:В уже 50 Гц (діаграма С). З виводу 9 тригера D2:В знімаються неінвертовані імпульси частотою 50 Гц (діаграма D).

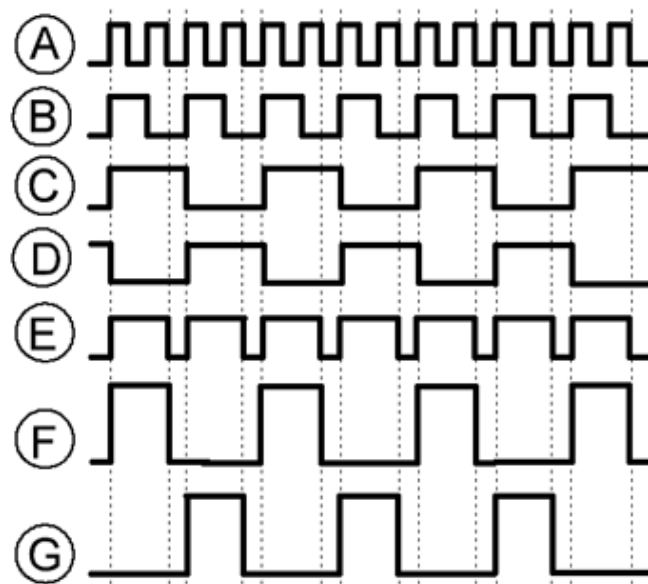


Рисунок 4.1 — Часові діаграми роботи інвертора

Діоди VD1, VD2 виконують логічну операцію «АБО», в результаті чого, імпульси ,які подаються на аноди діодів формують діаграму E на їх катодах. Каскад на транзисторах V1, V2 – підсилювач. Він забезпечує відпирання польових транзисторів V5, V6. Транзистори V3, V4, що підключені до виводів мікросхеми D 2 по чергово відкриваються, запираючи тим самим то транзистор V5, то транзистор V6. Між імпульсами наявна пауза, що виключає протікання наскрізного струму через вихідні транзистори (це підвищує ККД). На діаграмах F та G показані імпульси, що керують роботою польових транзисторів V5, V6.

#### Висновки до розділу 4

В четвертому розділі розглядаються переваги паливного елемента на воді з силіконовою мембраною перед іншими видами паливних елементів у контексті застосування в якості джерела живлення для медичного устаткування переважно в умовах відсутності мережі 220 В.

Наведено схему інвертора, та його друковану плату, який забезпечує підключення приладів, розрахованих на живлення від 220 В до блоку паливних елементів з вихідною напругою 12 В.



Використання паливного елементу можна вважати доцільним особливо при тривалих стоянках польових шпиталів. Це може економити великі кількості палива й ресурс силових агрегатів або слугувати резервними джерелами у випадку відмови основних.

					БМ61.03.205.1191	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА ПРАЦІ

#### 5.1 Характеристика паливного елемента, який розробляється

##### 5.1.1 Характеристики

Основні технічні характеристики паливного елемента наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Характеристики паливного елемента і його функціональних блоків

№	Найменування приладу та функціональних блоків	Основні характеристики	Кількість	Позиція на рисунку
1.	Паливний елемент	Напруга: 0,4 В Сила струму: 10 мкА Клас електрозахисту: 0 [38]	1	—
2.	Резервуар з водою	Пластмасова трубка Об'єм: 20 мл Довжина: 70 мм Зовнішній діаметр: 6 мм Товщина: 0,5 мм	1	4
3.	Активний шар	Вуглецева тканина, з осадженою на платиноюю черню	2	3
4.	Мембрана	Силіконова трубка. Довжина: 60 мм Зовнішній діаметр: 8 мм Внутрішній діаметр: 6 мм	1	5
5.	Електроди	Платиновий дріт. Діаметр: 0,5 мм	2	2
6.	Мультиметр	Цифровий мультиметр	1	6
7.	Корпус	Пластмасова трубка Довжина: 60 мм Зовнішній діаметр: 10 мм Внутрішній діаметр: 9 мм	1	7

### 5.1.2. Складові частини схеми

За допомогою каталізатора з води виділяється водень, який потім іонізується. Електрони йдуть у зовнішнє електричне коло, тобто на електроди, а протони через протонпровідну мембрану, де вони відновлюються до води.

Функціональна схема паливного елемента наведена на рис. 5.1.

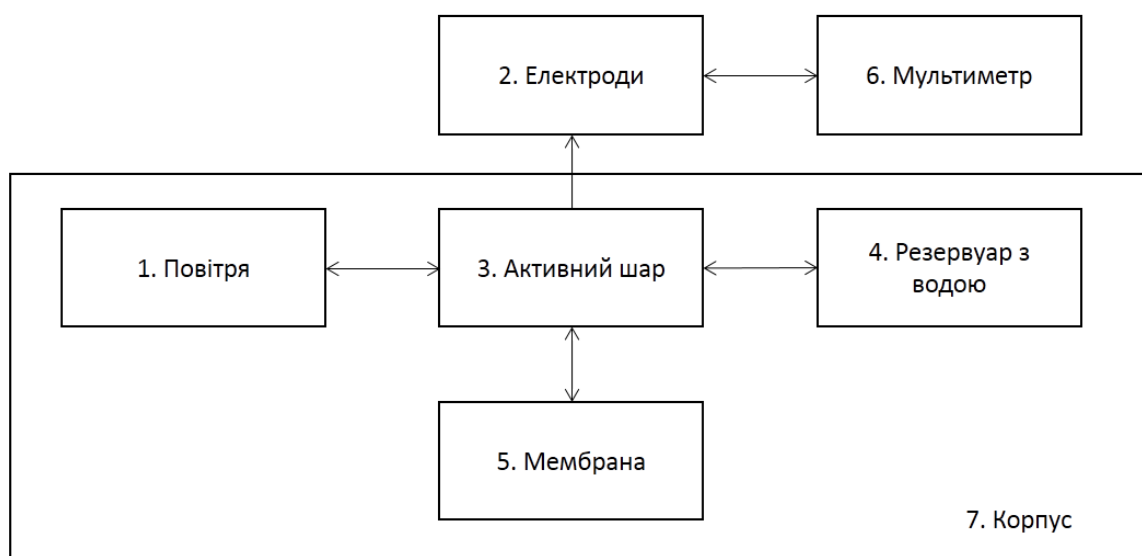


Рисунок 5.1 — Функціональна схема паливного елемента на воді.

### 5.1.3 Характер взаємодії паливного елемента в системі «людина – об'єкт»

Засоби отримання інформації про роботу паливного елемента представлені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Взаємодія паливного елемента в системі «людина – об'єкт»

№	Найменування функціонального блока	Вид відображення інформації	Кількість
1	Мультиметр	Сила струму, напруга на електродах.	1

Для контролю функціонування паливного елемента до нього підключається цифровий мультиметр, який відображає інформацію про напругу

та струм. Взаємодія між паливним елементом і людиною мінімальне, оскільки його використання не передбачає втручань.

## 5.2 Оцінка потенційних небезпек, що створюються конструкцією паливного елемента та заходи їх усунення

### 5.2.1 Небезпека ураження людини електричним струмом

Основною небезпекою є контакт людини зі струмопровідними елементами або елементами, що знаходяться під напругою.

Таблиця 5.3 – Основні небезпеки електричного характеру

№	Найменування функціонального блоку	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1.	Електроди	Постійний струм	Контакт з оголеним електродом	Ураження електричним струмом

Таблиця 5.4 Реальні та нормативні фактори небезпеки

№	Фактор небезпеки	Реальне значення	Нормативні значення
1.	Напруга	0,2 В	15 В

Таблиця 5.5 – Заходи з забезпечення безпеки роботи паливного елемента

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1.	Технічні засоби	Технічні заходи для забезпечення захисту від електричних небезпек не передбачаються [39]	—
2.	Організаційні заходи	інструкція з експлуатації, навчання персоналу;	доступність знань щодо безпеки експлуатації приладу;
3.	Режимні заходи	перевірка несправностей тільки у відключеному стані;	уникнення контакту з елементами під напругою;
4.	Експлуатаційні заходи	перевірка на цілісність ізоляції;	забезпечення безпечної роботи з об'єктом;
5.	ЗІЗ	не передбачені;	—

При роботі з паливним обладнанням достатньо дотримуватися стандартних норм роботи з електричним обладнанням.

### 5.2.3 Небезпека пожежі

Таблиця 5.6 – Основні небезпеки пожежі

№	Найменування функціонального блоку	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1.	Електроди	Електроди	Коротке замикання	Підвищення температури електродів, оплавлення ізоляції
2.	Корпус	Корпус	Зовнішнє джерело займання	Займання корпусу паливного елемента
3.	Мембрана	Силіконова трубка	Зовнішнє джерело займання	Займання мембрани паливного елемента

Таблиця 5.7 Реальні та нормативні фактори небезпеки

№	Фактор небезпеки	Клас пожежі
1.	Коротке замикання	Клас В, С
2.	Зовнішнє джерело займання	Клас В, С

Таблиця 5.8 – Заходи з забезпечення охорони праці

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1.	Технічні заходи	Використання важкогорючих матеріалів.	Запобігання розповсюдження пожежі.
		Гарно провітрюване приміщення або вентиляційна система.	Запобігання займанню водню або воднево-кисневої суміші.
2.	Організаційні заходи	Інструкція з експлуатації; навчання персоналу;	Доступність знань щодо безпеки експлуатації приладу
3.	Режимні заходи	Від'єднання джерела живлення від навантаження у випадку виникнення несправностей	Захист від електричного ушкодження
4.	Експлуатаційні заходи	Систематична перевірка справності паливного елемента	Своєчасне виявлення дефектів, які можуть призвести до загоряння;
5.	ЗІЗ	Не передбачені;	—

Так як ризик виникнення пожежі пов'язаний з плавленням і горінням пластмаси та полімеру, а також займанням водню або воднево-кисневої суміші паливний елемент відноситься до класів В і С пожежонебезпечної техніки.

Варто зазначити, що горіння водню або воднево-кисневої суміші вкрай малоймовірне, оскільки виділення  $H_2$  та його іонізація відбувається у дуже малих кількостях за рахунок каталізатору (платинової черні), тобто не є інтенсивним, а переважна кількість іонів проходить через мембрану і відновлює іони кисню.

Водень, що не проходить через мембрану поступово покидає паливний елемент, оскільки конструкція не є повністю герметичною і така летка речовина як водень може з легкістю перейти у зовнішню атмосферу.

Для виключення небезпеки займання водню варто встановлювати паливний елемент в гарно провітрюваному місці або забезпечити обдування повітрям.

### 5.3 Розробка «Інструкції з техніки безпеки при експлуатації паливного елемента»

Загальні положення, що стосуються прав і обов'язків обслуговуючого персоналу щодо дотримання вимог техніки безпеки:

- паливний елемент може експлуатувати тільки кваліфікований персонал;
- обслуговування паливного елемента може здійснювати тільки кваліфікований фахівець (сервісний інженер);

Технологічні вимоги щодо дотримання заходів безпеки перед початком роботи, під час роботи і після закінчення роботи та в умовах надзвичайних ситуацій:

					БМ61.03.205.1191	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- перед під'єднанням до приладів варто оглянути паливний елемент на предмет наявності пошкоджень ізоляції та корпусу;
- перед початком роботи необхідно перевірити сполучні кабелі та електроди і замінити елементи, якщо наявні очевидні ознаки псування і дефекти, що можуть бути ризиком для безпеки або правильної роботи приладу;
- не допускається контакт з електродами інших приладів;
- заборонено використовувати у безпосередній близькості легко горючими речовинами;
- в умовах аварійної ситуації рекомендується відключити живлення та/або уникати з ним контакту без засобів індивідуального захисту;

Особливості обслуговування паливного елемента на воді, безпечні прийоми роботи:

- під час транспортування слід злити воду і зафіксувати електроди;
- паливний елемент повинен проходити огляд і огляд на регулярній основі (раз на 1 рік). Сервісне обслуговування проводиться за необхідності. Результати тестів повинні документуватися і порівнюватися зі значеннями в супровідних документах.

## Висновки до розділу 5

У розділі 4 було виявлено та оцінено потенційно небезпечні і шкідливі виробничі фактори, створені конструкцією паливного елемента на воді, та заходи їх усунення. Основну небезпеку становлять електричні фактори, а також ризики, пов'язані з виникненням пожежі.

У результаті оцінки потенційних небезпек розроблено інструкцію з техніки безпеки при експлуатації паливного елемента.

					БМ61.03.205.1191	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

В даній роботі представлено паливний елемент на воді. Дана розробка розглядається в якості джерела живлення для медичної техніки невеликої потужності, яка експлуатується в місцях, де немає доступу до електричної мережі, або ж в якості заміни акумуляторів портативних приладів.

В ході роботи було виконано огляд літератури і проаналізовано інші види паливних елементів, а також аналогів, які у свої більшості є компактними зарядними станціями для електронних пристроїв.

З доступних матеріалів було розроблено прототип паливного елементу. Для поліпшення його характеристик необхідно змінювати форму самого елементу та технології виробництва. Особливу увагу необхідно звернути на каталітичний шар.

Наведений в роботі паливний елемент є найбільш зручним з розглянутих видів для зазначених застосувань. Його перевагами є:

- простота конструкції;
- відсутність рідких електролітів, які зазвичай є лугами або кислотами;
- робота при низьких температурах;
- доступність палива та простота його зберігання.

Дані якості забезпечують переваги перед іншими джерелами енергії за рахунок економії палива, високої надійності і придатності до ремонту шляхом швидкої заміни окремих блоків у випадку виявлення несправності.

В ході роботи велась співпраця з наступними організаціями:

- ТОВ науково-виробниче підприємство "Окта";
- кафедра технології електрохімічних виробництв «КПІ імені Ігоря Сікорського»;
- кафедра електронних приладів Університет "Україна";
- факультет конструювання та дизайну НУБіП України;
- державне науково-виробниче підприємство "Рубін" НАН України.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузмінський, Є. В. Паливні елементи. І. Сучасний стан розроблення [Текст] / Є. В. Кузмінський, К.О. Щурська, І. А. Самаруха // Відновлювана енергетика. – 2013. – № 1. – С. 90-96.

2. Троц А.А. Електрохімічний електролізер водяної пари як альтернативне джерело живлення / А.А. Троц, В.І. Скіцюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2013. Вип. 46 – С. 170 – 176.

3. Михайлів, М. І. Створення локальних джерел електроенергії на базі паливних комірок / М. І. Михайлів, П. В. Савуляк // Нафтогазова енергетика. - 2012. - № 1. - С. 101-112.

4. Новый материал для топливных элементов позволяет создавать долгосрочные «энергетические ячейки» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/ru/company/madrobots/blog/444088/>.

5. Японцы разработали новый тип топливных водородных элементов [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/ru/post/152023/>.

6. Норкин А. Водородные топливные элементы заряжают смартфон [Электронный ресурс] / Алексей Норкин. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.facepla.net/the-news/tech-news-mnu/2755-fuel-cell-rechager.html>.

7. В продаже появилось топливное зарядное устройство, работающее на водороде [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/ru/post/99864/>.

8. Powertrekk — портативная топливная ячейка для мобильных устройств [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/ru/post/113705/>.

9. Millimeter-Scale Fuel Cell With Onboard Fuel and Passive Control System [Электронный ресурс] / [S. Moghadam, E. Pengwang, K. Y Lin та ін.] // Institute of

Electrical and Electronics Engineers. – 2008. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.newscientist.com/article/dn16370-worlds-smallest-fuel-cell-promises-greener-gadgets/>.

10. Абрамова О. Как устроен топливный элемент [Электронный ресурс] / О. Абрамова. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-210>.

11. Василенко В. А. Математическое моделирование электрохимических процессов, протекающих в протонообменной мембране топливного элемента с прямой подачей метанола / В. А. Василенко, Э. М. Кольцова, В. Т. Новиков. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – №1. – С. 413 – 418.

12. Ярославцев А.Б., Никоненко В.В. Ионообменные мембранные материалы: свойства, модификация и практическое применение // Русские нанотехнологии. 2009. Т.4. 3 3-4. С. 44.

13. Иванчѐв С.С., Мякин С.В. Полимерные мембраны для топливных элементов: получение структура, модификация, свойства // Успехи химии. 2010. Т.2. №79. С.118.

14. Чирков Ю.Г., Ростокин В.И., Кузов А.В. “Компьютерное моделирование активного слоя катода топливного элемента с полимерным электролитом: учет процесса диффузии кислорода в зернах подложки” // Альтерн. энергетика и экология. 2014. № 6. С. 8–15.

15. Чирков Ю.Г., Ростокин В.И. “Активный слой катода топливного элемента с полимерным электролитом: природа каналов подачи протонов и кислорода” // Электрохимия. 2012. Т. 48. С. 1192–1204. [Chirkov Yu.G., Rostokin V.I. // Russ. J. Electrochem. 2012. V. 48. P. 1086.]

16. Смирнова Е.В., Кошель Н.Д. Влияние носителя платинового катализатора на характеристики кислородно-водородного мембранного топливного элемента // Вопр. Химии и хим. технологии. – 2013. – № 2. – С. 134-138.

17. Смирнова Е.В., Кошель Н.Д. Активность электродов мембранного элемента  $H_2-O_2$  с активными слоями на основе бинарных углеродных смесей // Вопр. Химии и хим. технологии. – 2013. – № 4. – С. 182-185.

18. Протонообменные мембраны для низко температурных электрохимических устройств [Текст] / Ю. А. Добровольский [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – № 8 (76).– С. 112 – 132.

19. Гринберг, В. А. Микротопливные элементы: современное состояние и перспективы развития (обзор) [Текст] / В. А. Гринберг, А. М. Скундин // Электрохимия. – 2010. – Т.46, № 9, – С. 1027 – 1043.

20. Систер В.Г., Фатеев В.Н., Бокач Д.А. Влияние состава и структуры топливного электрода на рабочие характеристики метанольного топливного элемента // Электрохимия. 2007. Т. 43. № 9. С. 1153-1156.

21. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.

22. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы. Под редакцией акад. Сергеева Е.М. М.: Недра, 1986. 255 с.

23. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: МГУ, 1995. 368 с.

24. Nigmatullin R.R. The realization of the generalized transfer equation in a medium with fractal geometry // Phys. stat. sol. (b). 1986. V.133. P.425.

25. Weber A.Z., Hickner M.A. Modeling and high-resolution imaging studies of water-content profiles in a polymer-electrolyte-fuel-cell membrane-electrode assembly // Electrochim. Acta 2008. V. 53. P. 7668–7674.

26. Загудаева Н.М., Тарасевич М.Р., Малеева Е.А. Электрохимические свойства катодных бинарных систем на основе платины для водородно-воздушных топливных элементов с полибензимидазольными мембранами // Альтернативная энергетика и экология. 2007. Т. 52. № 8. С. 79-83.

27. Croissant M.J., Napporn T., Leger J.-M., Lamy C. Electrocatalytic oxidation of hydrogen at platinum-modified polyaniline electrodes // *Electrochim. Acta*. 1998. Vol. 43. P. 2447-2457.

28. Чеботин В.Н. Электрохимия твердых электролитов / В.Н. Чеботин, М.В. Перфильев – М.: Химия, 1978 – 312 с.

29. Васильев В.П. Аналитическая химия. Учеб. для студентов вузов, обучающихся по химико-технол. специальности. / Васильев В.П. – Москва: Дрофа, 2002. – С.179 – 181.

30. O. Vasilyev. Historic. Aspects of Fuel Cell Development in Ukraine. / O. Vasilyev. – Kiev: NATO ARV Fuel Cell Technologies: State and Perspectives, 2004. – P. 19–89.

31. Пальчик О.А. Моделювання автономного джерела живлення на базі паливних елементів / Пальчик О.А. – Київ: науковий журнал національного університету біоресурсів і природокористування України, 2011. – С. 5–6.

32. Яковлев, А. И. Анализ топливных элементов на основе твердооксидных электролитов на пути дальнейшего развития водородной энергетики в Украине [Текст] / А. И. Яковлев, А. Р. Щекин // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2013. – № 3. – С. 45 – 60.

33. Коровин, Н. В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки [Текст] / Н. В. Коровин. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 280 с.

34. Scharfer P., Schabel W., Kind M. The impact of mass transport and methanol crossover on the direct methanol fuel cell // *Journal of Membrane Science*. 2007. V.303. P.37.

35. Schlögl R. Membrane permeation in systems far from equilibrium // *Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie*. 1966. 770. S.400-414.

36. Кольцова Э.М., Василенко В.А., Тарасов В.В. Численные методы решений во фрактальных средах // *Журн. физ. химии*. 2000. Т.74. № 5. С.954.

37. Mukherjee P.P., Wang C.Y. Stochastic microstructure reconstruction and direct numerical simulation of the PEFC catalyst layer // J. Electrochem. Soc. 2006. V. 153. P. A840-A849.

38. ДСТУ EN 60529:2018 Ступені захисту, забезпечувані кожухами. Чинний від 01.01.2020 — Київ : Технічний комітет «Безпека промислової продукції та засоби індивідуального захисту працюючих» (ТК 135), 2020 – (Система стандартів безпеки праці).

39. Правила улаштування електроустановок. Чинний від 21.07.2017 — Київ: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017 — п. 1.7.55 — (Система стандартів безпеки праці).

40. Троц А.А. Екологічне джерело живлення / А.А. Троц, М.Ф. Богомолів. // Міжнародна конференція «Крамаровські читання». – 2017. – С. 47 – 50.

					БМ61.03.205.1191	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## Додаток А

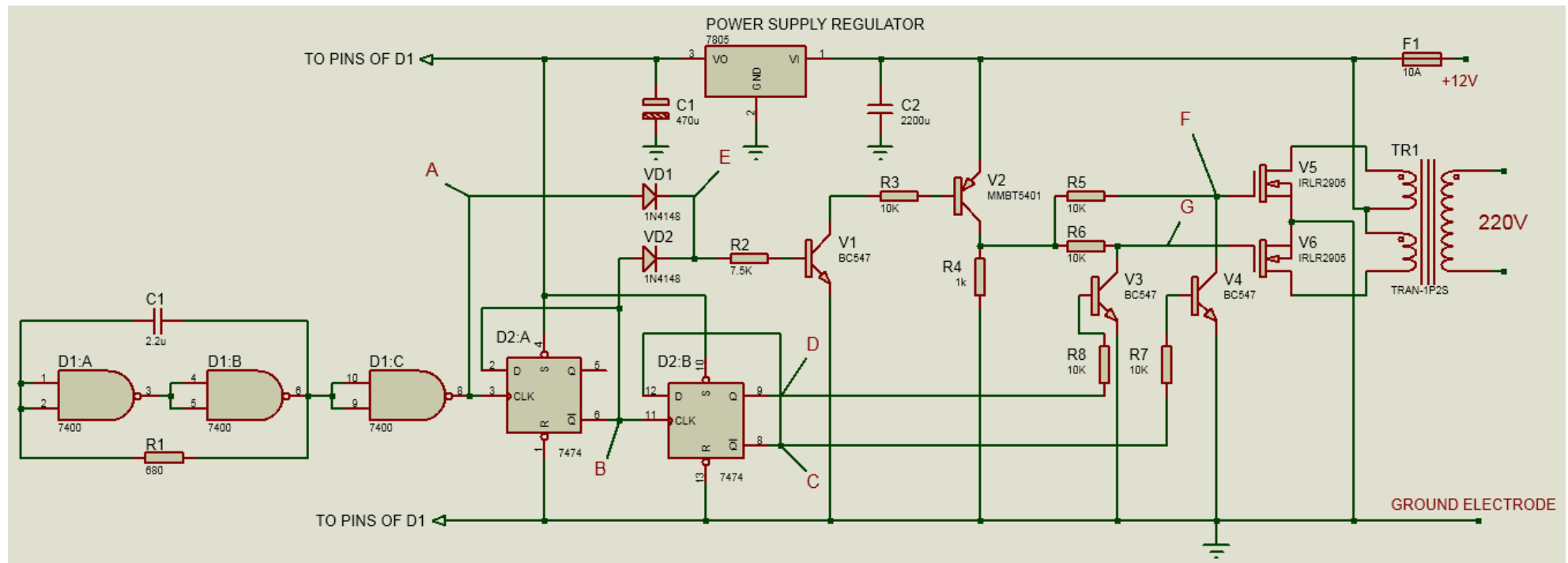


Рисунок А.1 — Схема інвертора 12 – 220 В електрична принципова

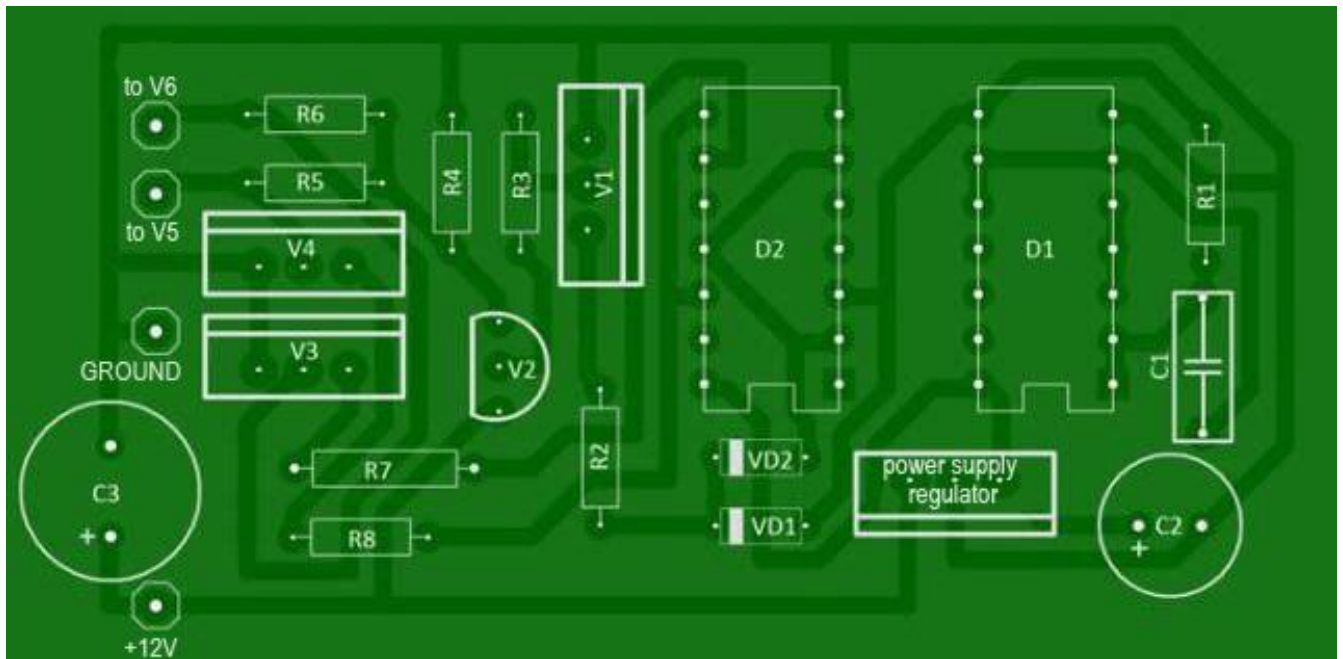


Рисунок А.2 — Друкована плата інвертора

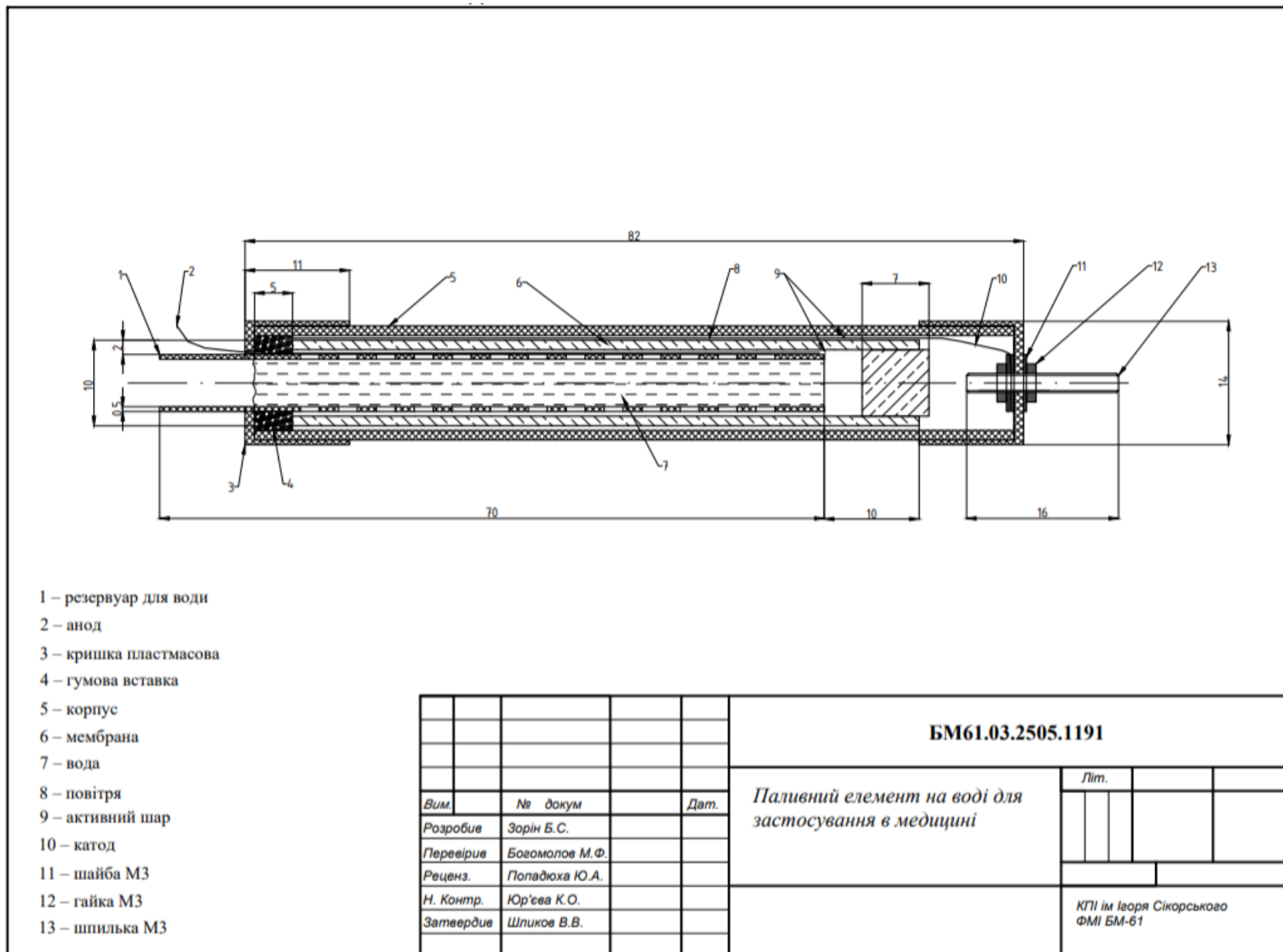


Рисунок А.3 — Креслення паливного елемента на воді